

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**В.П. Обрусник**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Монография*

**Томск  
2009**

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра промышленной электроники**

**В.П. Обрусник**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Монография**

**2009**

Рецензенты: профессор кафедры электропривода и электрооборудования ТПУ, д-р техн. наук **Бейнарович В.А.**;  
директор Томского НИИ автоматики и электромеханики, профессор, д-р техн. наук **Шурыгин Ю.А.**

### **Обрусник В.П.**

Теоретические положения оптимизации удельно-экономических показателей магнитных элементов: Монография. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2009. — 55 с.

Описаны основные приемы и положения оптимизации удельно-экономических показателей (УЭП) магнитных элементов (МЭ). Указана сущность этой оптимизации — определение наилучших параметров известных конструкций МЭ, обеспечивающих им наилучшие УЭП. Приведены выражения геометрии МЭ и определены ее оптимальные показатели для стержневых, броневых, чашечных и тороидальных исполнений МЭ.

Монография предназначена для инженеров, студентов и научных работников, занимающихся вопросами изучения и проектирования МЭ в областях электромеханики, электроники, радиотехники и преобразовательной техники.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Сущность оптимизации магнитных элементов.....	5
2. Выражения геометрии стержневых МЭ.....	9
3. Выражения геометрии броневых магнитных элементов .....	14
4. Выражения геометрии чашечных МЭ.....	19
5. Выражение геометрии тороидальных МЭ.....	26
6. Связь геометрических и физических величин МЭ .....	31
7. Оптимизация геометрических показателей МЭ.....	33
7.1. Основные уравнения для оптимизации.....	33
7.2. Оптимизация геометрии стержневых магнитных элементов .....	37
7.3. Оптимизация геометрии броневых магнитных элементов .....	39
7.4. Оптимизация геометрии чашечных магнитных элементов .....	41
7.5. Оптимизация геометрии тороидальных магнитных элементов .....	47
Заключение .....	52
Литература .....	53
Приложение. Таблицы с данными оптимальной геометрии МЭ....	54

## ВВЕДЕНИЕ

В работах [4, 5] автором настоящей книги приведено достаточно сведений по магнитным элементам (МЭ) электронных устройств (трансформаторам, дросселям, дросселям с подмагничиванием, магнитным усилителям, преобразователям числа фаз, умножителя и делителям частоты): по их конструктивному исполнению, принципу действия, классификации, схемам замещения, характеристикам в статике и динамике. Приведены методы проектирования и расчетов по данным технического задания. Приведены примеры этих расчетов для типовых конструкций МЭ — стержневых, броневых, чашечных и тороидальных. При этом считается, что исходные параметры МЭ для их проектирования на заданный удельно-экономический показатель (УЭП) — минимум объема, массы, стоимости или компромиссный вариант уже **установлены** и являются **оптимальными**. Для этого приводятся специальные таблицы.

В данной книге излагаются вопросы приемов и способов определения оптимальных показателей-параметров для **геометрии** МЭ, обеспечивающей заданный УЭП. В этом плане содержание книги является оригинальным и публикуется впервые.

# 1. СУЩНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Есть два варианта.

Первый вариант **независимой геометрии**, когда она не привязана к фактору увеличения зависимости от поверхности охлаждения. Здесь поверхности магнитопровода и катушек должны быть достаточными для отдачи тепла от потерь мощности в них.

Второй вариант, когда геометрия **существенно зависит** от поверхностей охлаждения МЭ. Чем больше эти поверхности, тем больше полезная мощность в нагрузке при постоянных значениях сечений магнитопровода и катушек.

Примеры указанных выше двух вариантов оптимизации геометрии МЭ показаны на примере броневой конструкции (рис. 1, а и рис. рис. 1, б).

Для рис. 1, а магнитопровод и катушки имеют **минимальные объемы**. Мощность пропорциональна произведению сечений  $S_k$  и  $S_c$ , каждое из которых есть квадрат из четырех клеток. Здесь

$$K_s = \frac{S_k}{S_c} = 1, \quad x = \frac{C_k}{a} = 1, \quad y = \frac{b}{a} = 1, \quad z = \frac{h_k}{a} = 1.$$

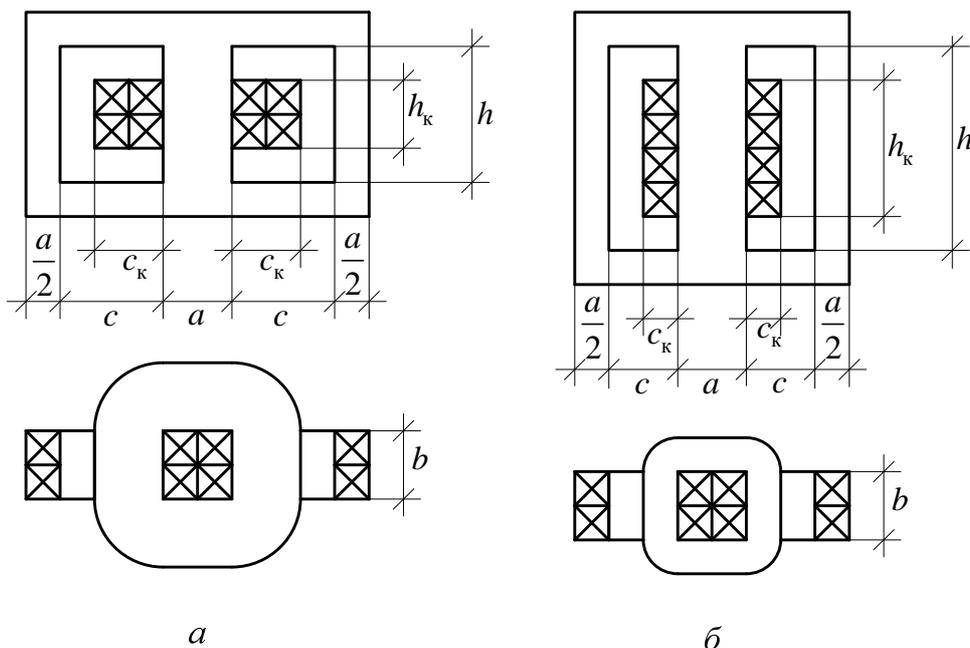


Рис. 1

Для рис. 1, б мощность при тех же значениях  $S_k$  и  $S_c$ , равным четырем клеткам, будет больше за счет улучшения охлаждения катушки через сердечник.

Какой из указанных вариантов оптимизации лучше сказать однозначно трудно. В [2] указывается, что зависящая от поверхностей охлаждения геометрия МЭ при тех же сечениях  $S_k$  и  $S_c$  дает возможность увеличить отдаваемую в нагрузку мощность.

Для исследования оптимальной геометрии МЭ имеет важное значение выражение

$$\Theta = \frac{K_{\text{эк}} \cdot V_k + K_{\text{эс}} \cdot V_c}{P_1}, \quad (1.1)$$

где  $K_{\text{эк}}$  — коэффициент экономического показателя катушки;

$K_{\text{эс}}$  — коэффициент экономического показателя сердечника (магнитопровода).

Для объемов

$$K_{\text{эк}} = K_{\text{эс}} = 1. \quad (1.2)$$

Для весового экономического показателя (УЭП)

$$K_{\text{эк}} = K_{\text{зк}} \cdot g_k, \quad K_{\text{эс}} = K_{\text{зс}} \cdot g_c. \quad (1.3)$$

Для стоимостного УЭП

$$K_{\text{эк}} = K_{\text{зк}} \cdot g_k \cdot \Pi_k, \quad K_{\text{эс}} = K_{\text{зс}} \cdot g_c \cdot \Pi_c, \quad (1.4)$$

где  $K_{\text{зк}}$ ,  $K_{\text{зс}}$  — коэффициенты заполнения катушек и сердечников активными материалами;

$g_k$ ,  $g_c$  — удельные веса катушек и сердечников, соответственно;

$\Pi_k$ ,  $\Pi_c$  — стоимость единицы веса катушек и сердечников.

$P_1$  — входная мощность МЭ

$$P_1 = 4K_\phi \cdot n_0 \cdot K_{\text{зс}} \cdot K_{\text{ок}} \cdot j \cdot B \cdot f_1 \cdot S_c^2 \left( \frac{S_{\text{ок}}}{S_c} = K_s \right), \quad (1.5)$$

где  $K_\phi$  — коэффициент формы питающего напряжения; для синуса  $K_\phi = 1.11$ , прямоугольника 1 и т.д.;

$n_0$  — какую часть в окне магнитопровода занимает первичная обмотка; для трансформатора  $n_0 = 0.5$ , для дросселя  $n_0 = 1$ , для магнитного усилителя 1,75 и др.;

$K_{\text{ок}}$  — коэффициент заполнения окна магнитопровода активными проводниками обмоток;

$K_{\text{зс}}$  — коэффициент заполнения сечения магнитопровода ферроматериалом; для прессованных сердечников (ферриты)  $K_{\text{зс}} = 1$ , для штампованных и ленточных сердечников  $K_{\text{зс}} = 0.85 \div 0.9$ ;

$j$  — плотность тока в обмотках, усредненная,  $\text{А/м}^2$ ;

$B$  — рабочая индукция магнитопровода (Тл), равная или меньшая индукции насыщения  $B_s$ ;

$f$  — частота напряжения или тока питающей сети, Гц;

$S_{\text{ок}}$  и  $S_c$  — сечение окна и магнитопровода,  $\text{м}^2$ ;

$K_s = \frac{S_{\text{ок}}}{S_c}$  — относительное значение соотношения сечений

окна и сердечника магнитопровода.

Имеем также.

Для объема сердечника

$$V_c = S_c L_c = S_c \sqrt{S_c} \frac{r'}{\sqrt{y}} (m' + q'x + pz) = S_c^{1.5} l_c. \quad (1.6)$$

Здесь

$$l_c = \frac{r'}{\sqrt{y}} (m' + q'x + pz), \quad (1.7)$$

где  $l_c$  — безразмерная средняя длина магнитопровода.

Для объема катушек

$$V_k = S_{\text{ок}} K_{\text{ок}} L_k \frac{S_c}{S_c} = K_s S_c \sqrt{S_c} \frac{r'}{\sqrt{y}} (m + ny + qx) = S_c^{1.5} K_s l_k. \quad (1.8)$$

Здесь

$$l_k = \frac{r}{\sqrt{y}} (m + ny + qx), \quad (1.9)$$

где  $l_k$  — безразмерная средняя длина витков катушки.

В выражениях (1.6)÷(1.9) параметры  $m, m', n, p, q, q', r, r'$  — конструктивные коэффициенты.

Для типовых конструкций МЭ (стержневая, броневая, чашечная, тороидальная) значения этих коэффициентов приведены в разделах 2, 3, 4.5.

Решая совместно выражения (1.1), (1.5), (1.6) и (1.8) получаем

$$\mathcal{E} = \frac{K_{\text{эс}} \left( \frac{K_{\text{эк}}}{K_{\text{эс}}} \cdot K_s \cdot l_{\text{к}} + l_{\text{с}} \right)}{\sqrt[4]{K_s^3} \cdot \sqrt[4]{\left( 4K_{\phi} \cdot n_0 \cdot K_{\text{зс}} \cdot K_{\text{ок}} \cdot j \cdot B \cdot f_1 \right)^3}} = A_9 \cdot \upsilon. \quad (1.10)$$

Здесь  $A_9$  — физическая величина

$$A_9 = \frac{K_{\text{эс}}}{\sqrt[4]{\left( 4K_{\phi} \cdot n_0 \cdot K_{\text{зс}} \cdot K_{\text{ок}} \cdot j \cdot B \cdot f_1 \right)^3}}, \quad (1.11)$$

когда все ее составляющие известны.

$$\upsilon = \frac{\frac{K_{\text{эк}}}{K_{\text{эс}}} \cdot K_s \cdot l_{\text{к}} + l_{\text{с}}}{\sqrt[4]{K_s^3}}, \quad (1.12)$$

где  $\upsilon$  — геометрический безразмерный показатель **независимой** от физических величин оптимальной геометрии МЭ, обеспечивающей ей **наилучшие** удельно-экономические показатели (УЭП). Величина  $\upsilon$  по формуле (1.12) имеет минимумы.

У каждой конструкции МЭ характер кривых  $\upsilon$  будет свой. Все зависит от формул для  $l_{\text{с}}$  и  $l_{\text{к}}$ .

Для случая оптимизации УЭП МЭ, когда индукция и плотность тока зависят от геометрии элемента, выражение для  $\upsilon$  будет отличаться от формулы (1.12).

Оптимизация значений  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $K_s$  для магнитных элементов по выражению (1.12) сделана в разделе 7.

## 2. ВЫРАЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ СТЕРЖНЕВЫХ МЭ

Конструктивное исполнение стержневых магнитных элементов (С-МЭ) показано на рис. 2.1.

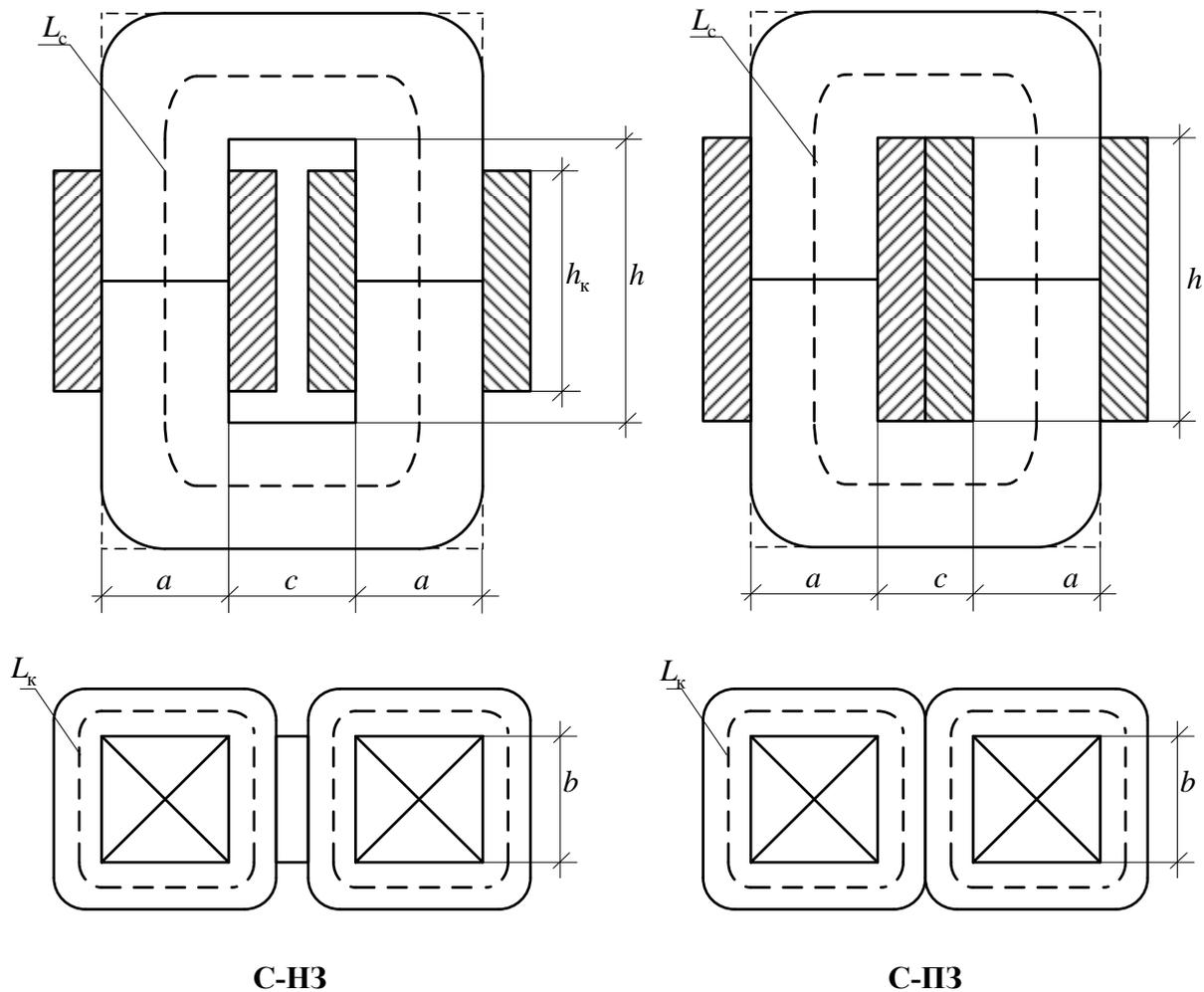


Рис. 2.1

На этом рисунке обозначены:

$a, b$  — ширина и толщина магнитопровода;

$c$  — ширина окна;

$h$  — высота окна;

$c_k, h_k$  — толщина и высота катушки.

Стержневые конструкции МЭ занимают по техническим и экономическим показателям промежуточное положение между броневыми и тороидальными исполнениями. У конструкций МЭ используемых в установках с принудительным охлаждением целесообразно окна магнитопровода заполнять катушками обмоток

не полностью и оставлять примерно 35 % сечения окна для канала охлаждения. В этом случае неполное заполнение окна (НЗ) против полного (ПЗ) примерно 15 % увеличивает поверхность охлаждения МЭ, но мощность при прежних размерах магнитопровода увеличивается в 5—7 раз. При естественном охлаждении эффект теплоотдачи через воздушные каналы в окне начинается при ширине этих каналов не менее 12—15 мм, когда возможна конвенция.

Для частоты индукции менее 500 Гц магнитопроводы выполняются из штампованных пластин толщиной 0.2 мм и более. Они имеют прямоугольную форму, которую имеют также сердечники прессованные для частоты более 10 кГц, например – ферриты.

При расчетах удобно пользоваться относительными размерами магнитопровода, когда за базисную величину берется его ширина  $a$ . Тогда для стержневой конструкции имеем:

$$x = \frac{c}{a}, \quad y = \frac{b}{a}, \quad z = \frac{h}{a};$$

$$S_c = ya^2 \text{ — сечение магнитопровода;}$$

$$S_{ок} = xa^2z \text{ — сечение окна.}$$

Относительное значение сечения окна по отношению к сечению магнитопровода  $K_s$ :

$$K_s = \frac{S_{ок}}{S_c} = \frac{a^2xz}{a^2y} = \frac{xz}{y}. \quad (2.3)$$

Выражение для средней длины витков катушки

$$\begin{aligned} L_k &= 2(a + b + 0.5\pi \cdot c_k) = 2a(1 + y + 0.5\pi \cdot n_c \cdot x) = \\ &= r \cdot \frac{\sqrt{S_c}}{y} (m + ny + qx) = \sqrt{S_c} l_k. \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\text{Здесь } r = 2, \quad m = 1, \quad n = 1, \quad q = 0.5\pi \cdot n_c. \quad (2.5)$$

Параметр  $n_c$  показывает, какую часть окна занимает толщина катушки  $C_k$ . Этот показатель является разным для заполнений окна, хотя отличается он незначительно; для ПЗ  $n_c = 0.5$ , для НЗ  $n_c = 0.4$ .

В расчетах целесообразно брать среднюю величину

$$q = 0.5(q_{пз} + q_{нз}) = 0.5(0.785 + 0.628) \approx 0.7. \quad (2.6)$$

В выражении (2.4) содержится **безразмерное** значение средней длины витка катушки  $l_k$ , которое с учетом конструктивных коэффициентов по (2.5), (2.6) получает вид

$$l_k = \frac{2}{\sqrt{y}}(y + 0.7x + 1). \quad (2.7)$$

Средняя длина силовой линии магнитопровода  $L_c$  является **одинаковой** для конструкций с ПЗ и НЗ. Ее выражение имеет вид

$$\begin{aligned} L_c &= 2(h + c + 0.5\pi \cdot a) = 2a(x + z + 0.5\pi) = \\ &= \sqrt{S_c} \cdot \frac{2}{\sqrt{y}}(x + z + 0.5\pi) = \sqrt{S_c} \cdot \frac{r'}{\sqrt{y}}(m' + q'x + pz) = \sqrt{S_c} \cdot l_c. \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\text{Здесь } r' = 2, \quad m' = 0.5\pi \approx 1.5q' = 1, \quad p = 1. \quad (2.9)$$

Если магнитопровод из шихтованных пластин, то величина  $\pi$  заменяется на 4, что дает  $m' = 2$ .

Итак, длина магнитопровода  $L_c$  является произведением величин  $\sqrt{S_c}$  и  $l_c$ , где

$$l_c = r'(m' + q'x + pz) \frac{1}{\sqrt{y}} \quad (2.10)$$

есть безмерная длина силовой линии магнитопровода.

С учетом значений коэффициентов по (2.9) получаем

$$l_c = 2(x + z + 0.5\pi) \frac{1}{\sqrt{y}}. \quad (2.11)$$

Поверхности охлаждения как у сердечников, так и у катушек существенно отличаются между собой для случаев полного и неполного заполнения окна.

Поверхность охлаждения сердечника при **полном** заполнении окна катушкой

$$\begin{aligned} P_{\text{ос, пз}} &= (2a + b)(L_c - 2h) = (2a + b)(2c + \pi a) = \\ &= a^2(2 + y)(2x + \pi) = S_c \cdot l_c \cdot N_{\text{спз}}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Здесь  $a^2 = S_c / \sqrt{y}$ , по (2.1),  $l_c$  по (2.11);  $N_{\text{спз}}$  — безразмерный **периметр** поверхности охлаждения сердечника С-МЭ при **полном** заполнении окна.

$$N_{\text{оспз}} = \frac{(2+y)(2x+\pi)}{2(0.5\pi+x+z)}. \quad (2.13)$$

Поверхность охлаждения сердечника при **неполном** заполнении окна катушкой

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ос, нз}} &= 2(a+b)(L_c - 2h_k) = \\ &= 2(a+b) \left[ 2a(z+x+0.5\pi) - 2h \cdot 0.8 \frac{a}{a} \right] = \\ &= 2a(1+y) \cdot 2a[z+x+0.5\pi - 0.8z] = \\ &= 4S_c \cdot \frac{1}{\sqrt{y}} (1+y)(x+0.2z+0.5\pi) = S_c \cdot l_c \cdot N_{\text{снз}}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Здесь  $N_{\text{снз}}$  — **безразмерный** периметр поверхности охлаждения С-МЭ при **неполном** заполнении окна катушкой.

$$N_{\text{оснз}} = \frac{2(1+y)(x+0.2z+0.5\pi)}{x+z+0.5\pi}. \quad (2.15)$$

Поверхность охлаждения **катушек** С-МЭ при **полном** заполнении окна магнитопровода

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ок, пз}} &= 2(c+h)(L_k - b) = 2(c+h)(2a+b+0.5\pi \cdot c) = \\ &= \frac{2S_c}{y} (x+z)(0.5\pi \cdot x + y + 2) = S_c \cdot l_k \cdot N_{\text{кпз}}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Здесь

$$N_{\text{окпз}} = \frac{(z+x)2 \cdot (0.2\pi \cdot x + 0.5y + 1)}{\sqrt{y} \cdot (0.25\pi \cdot x + y + 1)}. \quad (2.17)$$

Поверхность охлаждения катушек С-МЭ при **неполном** заполнении окна описывается выражением

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ок, нз}} &= 2(h_k + 2c_k)L_k = \\ &= 2(0.8h + 2 \cdot 0.4c) \cdot 2(a+b+0.5\pi \cdot 0.4c) = \\ &= 2a(0.8z+0.8x)2a(0.2\pi \cdot x + y + 1) = \\ &= 3.2(x+z)(0.2\pi \cdot x + y + 1) \frac{S_c}{y} = S_c \cdot l_k \cdot N_{\text{кнз}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

В преобразованиях в выражении (1.18) взяты  $L_k$  по (2.4) с учетом (2.5),  $a^2 = S_c / y$  по (2.1).

Формула для  $N_{\text{кнз}}$ , безразмерного **периметра** поверхности охлаждения катушек С-МЭ при **неполном** заполнении окна катушками получается, если левую часть выражения (2.18) помножить и поделить на  $l_k$  из (2.7).

Получаем

$$N_{\text{окнз}} = \frac{1.6(x+z)}{\sqrt{y}}. \quad (2.19)$$

Если сравнить значения  $N_{\text{окнз}}$  по (2.19) и  $N_{\text{окпз}}$  по (2.17) для одинаковых  $x, y, z$ , например оптимальных для УЭП, то  $N_{\text{окнз}}$  будет больше  $N_{\text{окпз}}$  примерно на 14%. Это немного, но для инженерной практики неполное заполнение катушками дает охлаждающие каналы, что позволяет увеличить отдаваемую мощность с единицы МЭ более чем 7 раз [7, стр. 72].

### 3. ВЫРАЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ БРОНЕВЫХ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Броневые (Б) исполнения магнитных элементов имеют одну катушку с обмотками, очень простые и технологичные в изготовлении. Обмотки защищены от механических повреждений магнитопровода, как «броней» (отсюда название броневые). Среди других конструкций броневые МЭ имеют наилучшие технико-экономические показатели: наименьшие значения массы, объема и стоимости на единицу габаритной мощности, однако им свойственно большое индуктивное сопротивление обмоток, что ограничивает применение при частотах более 1 кГц.

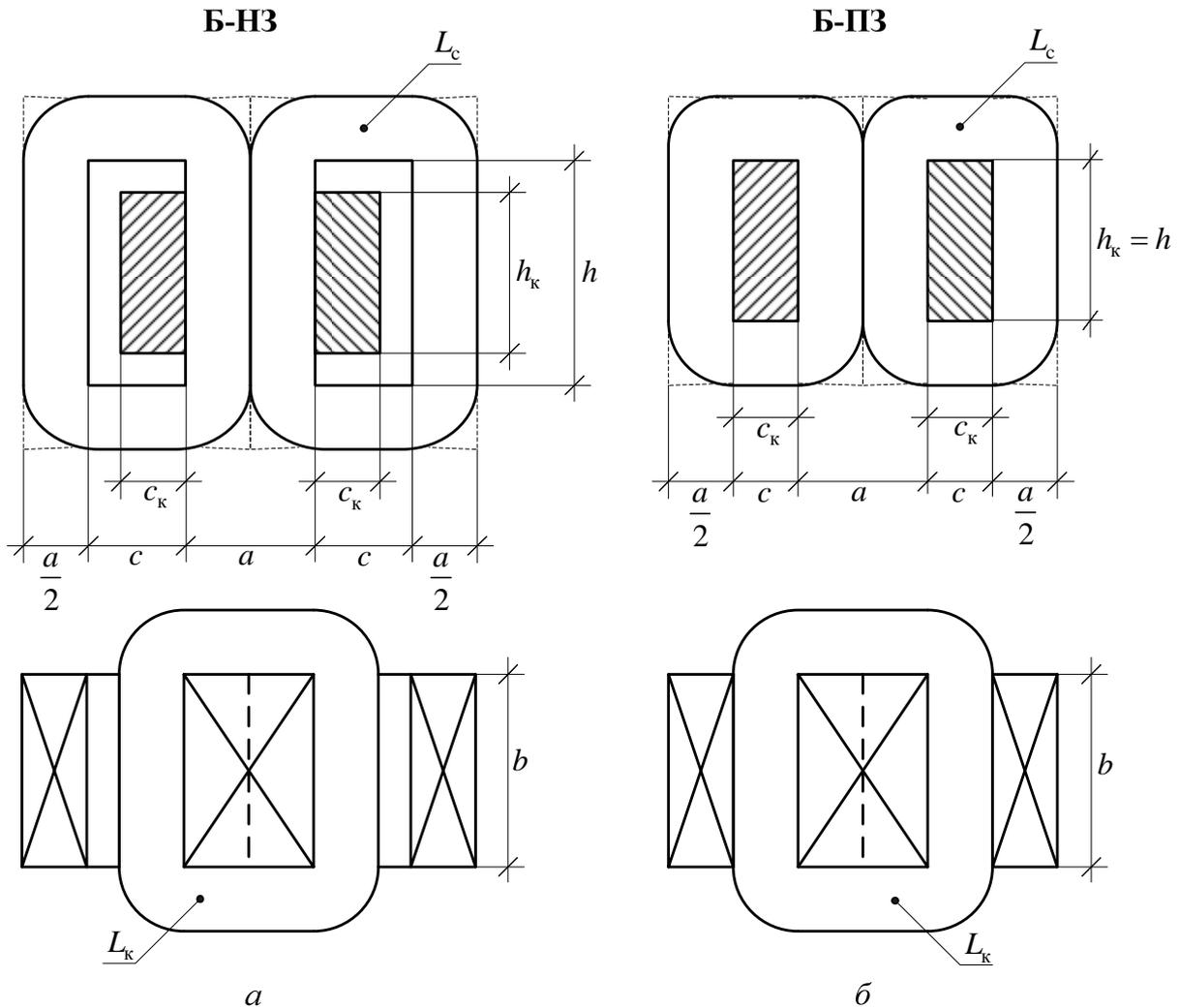


Рис. 3.1

На рис. 3.1 обозначены:

$a, b$  — ширина и толщина магнитопровода;

$c, h$  — ширина и высота окна магнитопровода;

$c_k, h_k$  — ширина и высота катушки.

Сердечник магнитопровода может быть из ленточных составляющих, когда  $f_1 > 400$  Гц или из штампованных пластин, когда  $f_1 < 400$  Гц (на рис. 3.1 показано пунктиром). Для штампованных пластин сердечников в формулах для геометрии вместо  $\pi$  следует брать 4.

Для относительных размеров магнитопровода имеем

$$x = \frac{c}{a}, \quad y = \frac{b}{a}, \quad z = \frac{h}{a}. \quad (3.1)$$

Сечение магнитопровода

$$S_c = ab = a^2 y. \quad (3.2)$$

Сечение окна

$$S_{ок} = hc = a^2 zx. \quad (3.3)$$

Выражение средней длины витков катушки

$$L_k = 2a + 2b + 2\pi \frac{c_k}{2} = 2a(1 + y + 0.5\pi \cdot c_k). \quad (3.4)$$

Для Б-МЭ имеем  $c_k = c$  при полном заполнении окна,  $c_k = 0.8c$  при неполном.

С учетом значения  $a$  по (3.2) запишем выражение (3.4) в виде

$$L_k = \sqrt{S_c} \cdot r (m + ny + qx) \frac{1}{\sqrt{y}} = \sqrt{S_c} l_k. \quad (3.5)$$

Здесь

$$r = 2, \quad m = 1, \quad n = 1, \quad q_{пз} = 0.5\pi = 1.57, \quad q_{нз} = 0.5\pi \cdot 0.8 = 1.256. \quad (3.6)$$

Значения  $q_{пз}$  и  $q_{нз}$  мало отличаются, их средняя величина будет равна

$$q_{ср} = 0.5(q_{пз} + q_{нз}) = 0.5(1.57 + 1.256) \approx 1.4.$$

В инженерных расчетах Б-МЭ принимается

$$q = 1.4. \quad (3.7)$$

С учетом приведенных выше численных значений коэффициентов получаем

$$l_k = 2(1 + y + 1.4x) \frac{1}{\sqrt{y}}. \quad (3.8)$$

Величина  $l_k$  по формуле (3.8) есть **безразмерное** значение средней длины витков катушки Б-МЭ.

Средняя длина магнитопровода (его силовой линии)  $L_c$  не зависит от полноты заполнения окна и описывается выражением

$$L_c = 2h + 2c + 2\pi \frac{a}{4} = 2a(z + x + 0.25\pi). \quad (3.9)$$

С учетом значения  $a$  по (3.2) запишем (3.9) в виде

$$L_c = \sqrt{S_c} \cdot r' (m' + q'x + pz) \frac{1}{\sqrt{y}} = \sqrt{S_c} \cdot l_c. \quad (3.10)$$

$$\text{Здесь } r' = 2, \quad m' = 0.25\pi, \quad q' = 1, \quad p = 1. \quad (3.11)$$

$l_c$  — **безразмерная** средняя длина силовой линии магнитопровода.

С учетом численных значений конструктивных коэффициентов получаем

$$l_c = 2(x + z + 0.25\pi) \frac{1}{\sqrt{y}}. \quad (3.12)$$

Поверхность охлаждения магнитопровода Б-МЭ при **полном** заполнении окна катушкой

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ос, пз}} &= 2 \left( 2 \frac{a}{2} + b \right) (L_c - h) = 2(a + b) \left( 2h + 2c + 2\pi \frac{a}{2} - h \right) = \\ &= 2a^2 (1 + y) (2x + z + \pi) = 2S_c \cdot \frac{1}{y} (1 + y) (2x + z + \pi) = \\ &= S_c \cdot l_c \cdot N_{\text{спз}}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Здесь

$$N_{\text{спз}} = \frac{(1 + y)(2x + z + \pi)}{\sqrt{y}(x + z + 0.5\pi)}. \quad (3.14)$$

Поверхность охлаждения магнитопровода Б-МЭ при **неполном** заполнении окна катушки

$$\Pi_{\text{ос, пз}} = \left[ \left( \frac{a}{2} + b \right) \cdot 2 \cdot (L_c - h_k) \right] \cdot 2. \quad (3.15)$$

С учетом того, что

$$h_k = 0.8h, \quad S_c = ab = a^2 y \quad \rightarrow \quad a = \sqrt{\frac{S_c}{y}},$$

получаем

$$\begin{aligned} L_c &= (c+h) \cdot 2 + 2\pi \frac{a}{4} = 2a \left( x+z + \frac{\pi}{4} \right) = \sqrt{S_c} \cdot \frac{2}{\sqrt{y}} \left( x+z + \frac{\pi}{4} \right) = \\ &= \sqrt{S_c} \cdot l_c. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Здесь  $L_c$  — **абсолютное** значение средней длины сердечника магнитопровода МЭ.

$$l_c = \frac{2}{\sqrt{y}} \left( x+z + \frac{\pi}{4} \right), \quad (3.17)$$

где  $l_c$  — **безразмерная** длина средней длины сердечника магнитопровода МЭ.

Отметим, что  $L_c$  и  $l_c$  не зависят от заполнения окна МЭ.

Сделаем преобразования выражения (3.15)

$$\begin{aligned} P_{\text{ос,нз}} &= 4 \left( \frac{a}{2} + b \right) (L_c - h_k) = \\ &= 4 \left( \frac{a}{2} + b \right) \left[ (c+h)2 + \frac{2\pi \cdot a}{4} - 0.8h \right] = \\ &= 8 \left( \frac{a}{2} + b \right) \left( c+h + \pi \cdot \frac{a}{4} - 0.4h \right) = \\ &= 4 \left( a^2 = \frac{S_c}{y} \right) (1+2y) \left( x+0.6z + \frac{\pi}{4} \right) \frac{l_c}{l_c} = \\ &= S_c \cdot l_c \cdot N_{\text{оснз}}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Здесь  $N_{\text{оснз}}$  — **безразмерное** значение поверхности охлаждения сердечников магнитопровода С-МЭ при **неполном** заполнении окна обмотками.

$$N_{\text{оснз}} = \frac{2(1+2y)(x+0.6z+0.25\pi)}{\sqrt{y}(x+z+0.25\pi)}. \quad (3.19)$$

### Поверхности охлаждения катушек Б-МЭ

При **полном** заполнении окна магнитопровода катушками для  $\Pi_{\text{ок,пз}}$  имеем

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ок,пз}} &= (2c + h)(L_{\text{к}} - 2b) = (2c + h) \left( 2a + 2b + \frac{2\pi \cdot c}{2} - 2b \right) = \\ &= 2 \left( a^2 = \frac{S_{\text{с}}}{y} \right) (1 + 0.5\pi \cdot x)(2x + z) \cdot \frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{к}}} = S_{\text{с}} \cdot l_{\text{к}} \cdot N_{\text{окпз}}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Для  $N_{\text{окпз}}$  получается

$$N_{\text{окпз}} = \frac{2(1 + 0.5\pi \cdot x)(2x + z)}{y \left[ l_{\text{к}} = 2(1 + y + 1.4x) \frac{1}{\sqrt{y}} \right]}.$$

Здесь  $l_{\text{к}}$  взято по (3.8).

После преобразования имеем

$$N_{\text{окпз}} = \frac{(1 + 0.5\pi \cdot x)(2x + z)}{\sqrt{y}(1 + y + 1.4x)}. \quad (3.21)$$

При **неполном** заполнении окна магнитопровода катушками для  $\Pi_{\text{ок,нз}}$ , когда  $c_{\text{к}} = 0.8c$ ,  $h_{\text{к}} = 0.8h$ , имеем

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ок,нз}} &= (2 \cdot 0.8c + 0.8h) \left( L_{\text{к}} = 2b + 2a + \frac{2\pi \cdot 0.8c}{2} \right) = \\ &= \left( a^2 = \frac{S_{\text{с}}}{y} \right) \cdot 1.6(1 + y + 0.4\pi \cdot x) \frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{к}}} = S_{\text{с}} \cdot l_{\text{к}} \cdot N_{\text{окнз}}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Из тождества (3.22) получается

$$N_{\text{окнз}} = \frac{1.6(2x + z)(1 + y + 0.4\pi \cdot x)}{y \left[ l_{\text{к}} = \frac{2}{\sqrt{y}}(1 + y + 0.4\pi \cdot x) \right]},$$

что после преобразования дает

$$N_{\text{окнз}} = \frac{1.6(x + 0.5z)}{\sqrt{y}}. \quad (3.23)$$

О важности геометрических показателей  $N_{\text{ос}}$  и  $N_{\text{ок}}$  в инженерных расчетах и формулы с их применением сказано в разделе 6.

#### 4. ВЫРАЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЧАШЕЧНЫХ МЭ

Конструктивное исполнение чашечных магнитных элементов (Ч-МЭ) показано на рис. 4.1.

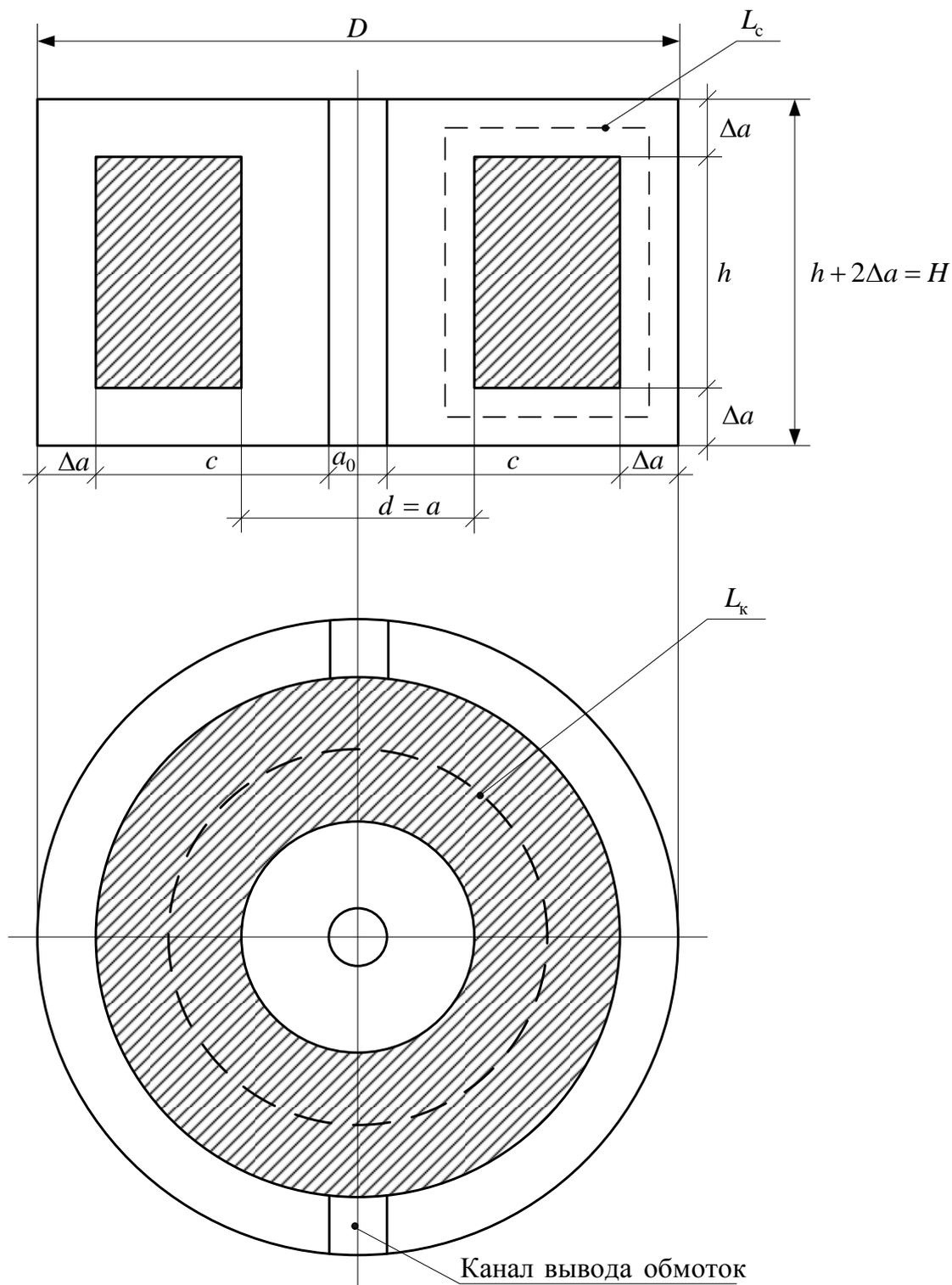


Рис. 4.1

Отличительной особенностью этого исполнения является то, что катушка с обмотками помещается внутри магнитопровода, вкладывается в две круглые одинаковые «чашки», накладываемые друг на друга. Внешнее расположение магнитопровода (относительно катушек) позволяет эффективно отводить от него тепловой нагрев, вызванный потерями мощности в ферромагнетике, которые являются существенными на высоких частотах.

Чашечные магнитопроводы выполняются прессованными из ферритовых материалов (по другому их не сделать) и применяются для изготовления Ч-МЭ, работающих на частотах 10 кГц и более.

Наиболее часто Ч-МЭ используются как однофазные трансформаторы и дроссели (индуктивности).

Элементная база современных электронных устройств позволяет работать на 100 кГц и более, но при таких частотах изготавливать магнитопроводы из электротехнических сталей или их сплавов становится нецелесообразным. Ферритовые сердечники (магнитопроводы) чашечных исполнений здесь будут иметь лучшие удельно-экономические показатели (УЭП): объем, массу и стоимость на единицу мощности.

Ряд фирм России и за рубежом выпускают чашечные магнитопроводы, которые пока, и, к сожалению, имеют малые линейные размеры, поэтому используются для изготовления Ч-МЭ малой и средней мощности: десятки-сотни Вт при частотах  $10 \div 20$  кГц и до 5 кВт при частотах  $50 \div 100$  кГц.

Малые мощности Ч-МЭ связаны с трудностями выполнения обмоток проводниками с большими сечениями.

В технической литературе вопросы оптимального расчета-исполнения Ч-МЭ представлены слабо, в том числе — почти не описана и не оптимизирована геометрия этих устройств. В редко встречающихся для них справочных данных, например [1. 4, 5] не поясняется, каким критериям УЭП они удовлетворяют, нет значений относительно размеров  $x$ ,  $y$ ,  $z$  важных для анализов.

На рис. 4.1 для геометрии Ч-МЭ показано:

$a$  — толщина и ширина или точнее — диаметр внутренней части магнитопровода, на которой размещена катушка с обмотками;

$\Delta a$  — толщина наружной части магнитопровода;

$c$  — ширина окна;

$h$  — высота окна;

$a_0$  — технологическое отверстие для стяжки и крепления магнитопровода;

$D, H$  — наружный диаметр и общая высота магнитопровода соответственно.

В справочной литературе приводят величины

$$d = a, \quad d_0 = a_0, \quad D, \quad H \quad \text{и} \quad h.$$

Значения  $\Delta a$  и  $c$  нужно подсчитать. В литературе не даются рекомендации по оптимальным соотношениям  $a_0/a$ ,  $\Delta a/a$ ,  $x = c/a$ ,  $z = h/a$ . Статистика значений  $a$ , полученная из данных справочников для параметров чашечных магнитопроводов, дает в среднем:

$$a_0 = 0.4d = 0.4a, \quad \Delta a = (0.22 \div 0.3)a.$$

Относительное значение технологического отверстия  $a_0$  под крепежный болт имеет логическое объяснение: растет диаметр сердечника  $a$ , увеличивается и диаметр болта, соотношение их  $a_0/a \cong 0.4$  мало меняется.

Для соотношения  $\Delta = \Delta a/a = 0.22 \div 0.3$  найти пояснение трудно. Для нормального распределения силовых линий магнитного потока Ч-МЭ достаточно выполнить условие, чтобы внутреннее сечение магнитопровода

$$S_{\text{св}} = \frac{\pi a^2}{4} - \frac{\pi(0.4a)^2}{4} \quad (4.1)$$

и сечение его наружной части

$$S_{\text{сн}} = \pi(a + 2c + \Delta a)\Delta a \quad (4.2)$$

были одинаковыми, то есть

$$S_{\text{св}} = S_{\text{сн}} = \frac{\pi a^2}{4}(1 - 0.16) = \pi a^2(1 + 2x + \Delta a)\Delta a,$$

где  $x = c/a$ .

Получаем

$$0.21 = \Delta^2 + (1 + 2x)\Delta, \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{-(1+2x)}{2} + \sqrt{(0.5+x)^2 + 0.21}. \quad (4.4)$$

$x$	0	0.25	0.5	0.75	1
$\Delta$	0.18	0.13	0.1	0.08	0.07

Как видно, толщина наружной части магнитопровода «чашки»  $\Delta a$  зависит от относительной ширины окна  $x$ . Если окно отсутствует ( $x = 0$ ), то  $\Delta$  максимально и равно 0.18. С увеличением  $x$  значение  $\Delta$  уменьшается до 0.1 и менее при  $x \geq 0.5$ . Реально конструкторы приняли  $\Delta \geq 0.2$ , обеспечивая запас сечения наружной части чашки для окон вывода обмоток. Для недопущения увеличения плотности потока в переходной части от внутреннего сечения к наружному и для обеспечения должной механической прочности тонких стенок хрупкого феррита при  $a \leq 10$  мм толщина  $\Delta a$  должна быть не менее 2 мм.

В приводимых далее формулах будем принимать удобные четные цифры:

$$\left. \begin{aligned} d_0 = a_0 = 0.4a, \\ \Delta a = 0.2a. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Теперь запишем основные выражения для геометрии Ч-МЭ на рис. 4.1.

Сечение внутренней части магнитопровода, на которой расположена катушка с обмотками

$$S_c = \frac{\pi}{4}(a^2 - a_0^2) = \frac{\pi}{4}a^2(1 - 0.4^2) = 0.66a^2. \quad (4.6)$$

*Примечание:* здесь и далее индекс «с» взят из технической литературы и соответствует понятиям «сердечник», «сталь», хотя правильнее было ставить индекс «м» — магнитопровод. Сердечник не есть магнитопровод, сталь — не есть феррит.

Из (4.6) получается

$$\boxed{a = 1.23\sqrt{S_c}}. \quad (4.7)$$

Сечение катушки  $S_k$  и окна  $S_{ок}$ :

$$S_k = S_{ок} = h \cdot c = a^2 \cdot x \cdot z. \quad (4.8)$$

Относительное значение окна:

$$K_s = \frac{S_{\text{ок}}}{S_c} = \frac{a^2 \cdot x \cdot z}{0.66a^2} = 1.5 \cdot x \cdot z,$$

откуда

$$x \cdot z \cong 0.66K_s. \quad (4.9)$$

Средняя длина витков катушки

$$L_k = \pi(a + c) = \pi a(1 + x). \quad (4.10)$$

Средняя длина силовой линии магнитного потока

$$L_c = 2h + 2c + 4 \cdot \Delta a = 2a(0.4 + x + z). \quad (4.11)$$

Наружный диаметр чашки

$$D = a + 2c + 2 \cdot \Delta a = 2a(0.7 + x). \quad (4.12)$$

Полная высота чашек (для обеих половин)

$$H = h + 2 \cdot \Delta a = a(0.4 + z). \quad (4.13)$$

Объем катушки

$$\begin{aligned} V_k &= S_k \cdot L_k = h \cdot c \cdot \pi \cdot a(1 + x) = a^3 \cdot x \cdot z \cdot \pi(1 + x) = \\ &1.23^3 \cdot S_c^{1.5} \cdot 0.66K_s \cdot \pi(1 + x) = S_c^{1.5} \cdot K_s \cdot l_k, \end{aligned} \quad (4.14)$$

где

$$l_k = 3.8954(1 + x) \cong 4(1 + x). \quad (4.15)$$

Значение объема сердечника определим двумя вариантами.

Первый вариант:

$$\begin{aligned} V_{c1} &= S_c \cdot h \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - a_0^2) 2 \cdot \Delta a + \pi(D - \Delta a)h \cdot \Delta a = \\ &= 0.66a^2 \cdot a \cdot z + \frac{\pi}{4} [4a^2(0.7 + x)^2 - 0.16a^2 \cdot 0.2a \cdot 2] + \\ &\quad + \pi[2a(0.7 + x) + 0.2a]0.2a \cdot h = \\ &= \boxed{0.4\pi \cdot a^3 (0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + x \cdot z)} = V_{c1}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Второй вариант:

$$\begin{aligned} V_{c2} &= L_c \cdot \Delta a \cdot L_k + \left( a_0 + \frac{\Delta a}{2} \right) 0.5\pi \cdot \Delta a \cdot H = \\ &= 2a(0.4 + x + z)0.2a \cdot \pi \cdot a(1 + x) + 0.5a \cdot \pi \cdot 0.1a(h + 0.4a) = \\ &= 0.4\pi \cdot a^3 (0.4 + x + z + 0.4 + x + x^2 + z \cdot x) + 0.05a^3 \cdot \pi(0.4 + z) = \end{aligned}$$

$$\boxed{=0.4\pi \cdot a^3 (0.45 + 1.4x + 1.1z + x^2 + z \cdot x) = V_{c2}.} \quad (4.17)$$

Выражения для  $V_c$ , найденные двумя вариантами получились **абсолютно одинаковыми**.

Приведем выражение  $V_c$  к типовому виду по [2], где

$$V_c = S_c^{1.5} \cdot l_c. \quad (4.18)$$

Подставляя в (4.17) значение  $a$  по (4.7), получаем

$$V_c = 2.34S_c^{1.5} (1.1z + 0.45 + 1.4x + x^2 + z \cdot x). \quad (4.19)$$

Сопоставляя (4.18) и (4.19) запишем

$$\boxed{l_c = 2.34(0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + z \cdot x).} \quad (4.20)$$

Как видно, относительно (безразмерное) значение усредненной длины магнитопровода Ч-МЭ описывается не простой формулой. Сравните ее, например, с  $l_c$  тороида:

$$l_c = \frac{\pi}{\sqrt{y}}(1 + x).$$

Осталось записать выражения для поверхности охлаждения Ч-МЭ.

В чашечных магнитных элементах тепло от потерь мощности в катушках и магнитопроводах отдается только через наружные поверхности магнитопровода. Для конструкции на рис. 4.1 (нет охлаждающих радиаторов, дно чашки плотно крепится к металлическому корпусу) будет иметь:

$$P_{oc} = P_{ок} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 2 + \pi \cdot D \cdot H. \quad (4.21)$$

Подставляя значения  $D$ ,  $H$  из (4.12), (4.13) получим при  $a = 1.23\sqrt{S_c}$  по (4.7):

$$\begin{aligned} P_{oc} &= \pi D(0.5D + h + 2 \cdot \Delta a) = \\ &= \pi(a + 2c + 2 \cdot \Delta a)(0.7a + c + h + 0.4a) = \\ &= 2\pi \cdot a^2 (0.7 + x)(0.11 + x + z) = \\ &= 2\pi \cdot a^2 (0.77 + 0.7x + x \cdot z + 0.7z + 1.1x + x^2) = \\ &= 2\pi \cdot 1.5S_c (0.77 + 1.8x + 0.7z + x^2 + x \cdot z). \end{aligned} \quad (4.22)$$

При приведении к типовой записи по [2]

$$P_{\text{oc}} = S_c \cdot l_c \cdot N_c, \quad (4.23)$$

где  $N_c$  — безразмерный периметр поверхности охлаждения.

Запишем выражение (4.22) в виде:

$$P_{\text{oc}} = 2\pi \cdot 1.5S_c \left[ 0.45 + 1.4x + 1.1z + x^2 + x \cdot z + 0.32 + 0.4x - 0.4z \right]. \quad (4.24)$$

Для выражения (4.24) составляющие в скобке формулы (4.22) приспособлены к выделению  $l_c$  по (4.19).

После преобразований в (4.24) получается

$$P_{\text{oc}} = S_c \cdot l_c \cdot 4 \left( 1 + \frac{0.75 + x - z}{l_c} \right) = S_c \cdot l_c \cdot N_c, \quad (4.25)$$

Здесь

$$N_c = 4 \left( 1 + \frac{0.75 + x - z}{l_c} \right). \quad (4.26)$$

Безразмерный геометрический параметр  $N_c$  называют [1, 6] относительным (для  $l_c$ ) периметром поверхности охлаждения магнитного элемента. Его учитывают при расчетах оптимальных значений рабочей индукции, плотности тока и сечения магнитопровода Ч-МЭ. Для чашечных магнитных элементов поверхности охлаждения магнитопровода и обмоток одинаковы, то есть  $N_c = N_k$ .

## 5. ВЫРАЖЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ МЭ

Конструктивное исполнение Т-МЭ показано на рис. 5.1.

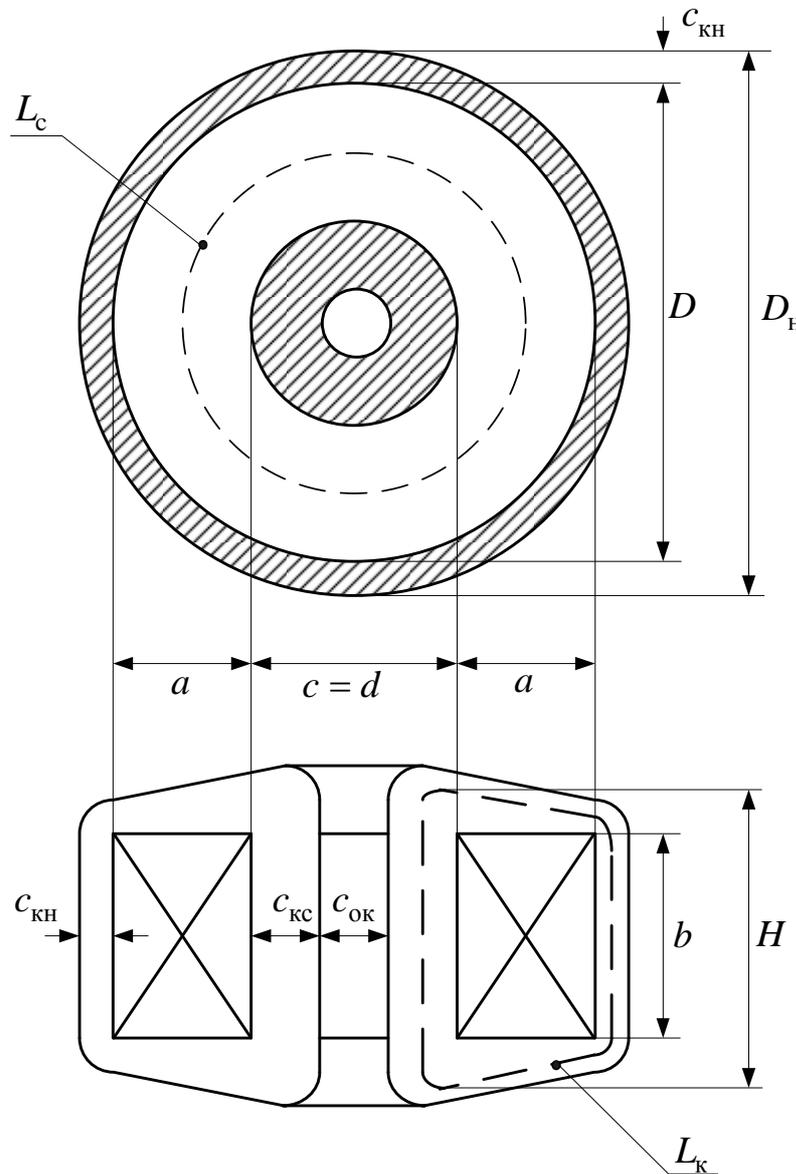


Рис. 5.1

Здесь обозначено:  
 $a, b$  — толщина магнитопровода и его ширина;  
 $c = d$  — диаметр окна магнитопровода;  
 $c_{KH}, c_{KB}$  — толщины катушки обмоток, наружная «н» и внутренняя «в» соответственно;

$D$  — наружный диаметр магнитопровода

$$D = 2a + c; \quad (5.1)$$

$L_c$  — средняя длина магнитопровода

$$L_c = \pi(a + c); \quad (5.2)$$

$L_k$  — средняя длина витков катушки обмоток

$$L_k \approx 2a + 2b + 2\pi \frac{c_{cp}}{2} = 2(a + b + 0.47c). \quad (5.3)$$

Число  $0.47c$  получается следующим образом

$$c_{ксп} = 0.5(c_{кн} + c_{кв}) = 0.5(0.2c + 0.4c) = 0.3c. \quad (5.4)$$

Принято  $c_{кн} = 0.2c$ ,  $c_{кв} = 0.4c$ .

После преобразования (5.3):

$$\begin{aligned} L_k &= 2 \left( a = \sqrt{\frac{S_c}{y}} \right) (1 + y + 0.47x) = \\ &= \sqrt{S_c} \cdot 2(1 + y + 0.47x) \frac{1}{\sqrt{y}} = \sqrt{S_c} \cdot r(m + n \cdot y + q \cdot x) \frac{1}{\sqrt{y}} = \\ &= \sqrt{S_c} \cdot l_k. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Здесь  $l_k$  — средняя безразмерная длина витков катушки

$$l_k = r(m + n \cdot y + q \cdot x) \frac{1}{\sqrt{y}}, \quad (5.6)$$

$$\text{где } r = 2, m = 1, n = 1, q = 0.47. \quad (5.7)$$

Сечение магнитопровода

$$S_c = a \cdot b = a^2 \cdot y, \text{ откуда } a = \sqrt{\frac{S_c}{y}}. \quad (5.8)$$

Средняя безразмерная длина магнитопровода  $l_c$

$$l_c = \pi(a + c) = \pi a(1 + x) = \pi \frac{\sqrt{S_c}}{\sqrt{y}} (1 + x + 0 \cdot z) = \sqrt{S_c} \cdot l_c. \quad (5.9)$$

Получается

$$l_c = \frac{\pi}{\sqrt{y}} (1 + x + 0 \cdot z) = \frac{r'}{\sqrt{y}} (m' + q' \cdot x + p \cdot z), \quad (5.10)$$

$$\text{где } r' = \pi, m' = 1, q' = 1, p = 0. \quad (5.11)$$

Объем магнитопровода

$$V_c = S_c \cdot L_c = S_c \cdot \pi(a + c) = S_c \left( a = \sqrt{\frac{S_c}{y}} \right) \pi(1 + x).$$

Получается

$$V_c = S_c^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{y}} (1 + x) = S_c^{\frac{3}{2}} \cdot l_c. \quad (5.12)$$

Объем катушки

$$V_k = c_{ксп} \cdot L_c \cdot L_k = 0.3c \cdot \pi(a + c) \cdot 2(a + b + 0.47c). \quad (5.13)$$

Здесь  $c_{ксп}$  взято по (5.4),  $L_c$  по (5.2),  $L_k$  по (5.3).

Преобразуя (5.13) с учетом, что  $a = \sqrt{\frac{S_c}{y}}$  по (5.8), получаем

$$\begin{aligned} V_k &= \left[ a^3 = \left( \frac{S_c}{y} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \pi \cdot 0.3x(1 + x) 2(1 + y + 0.47x) = \\ &= S_c^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{0.3\pi}{y} \cdot x(1 + x) 2(1 + y + 0.47x) \frac{1}{\sqrt{y}} = S_c^{\frac{3}{2}} K_{V_{кт}} l_k, \end{aligned} \quad (5.14)$$

где  $K_{V_{кт}}$  — коэффициент корректировки объема катушки

$$K_{V_{кт}} = \frac{0.3\pi}{y} \cdot x(x + 1). \quad (5.15)$$

Для усредненных значений  $y = 2$ ,  $x = 2$  величина  $K_{V_{кт}} \approx 1$ .

Значения конструктивных коэффициентов Т-МЭ по формулам (5.7) и (5.11) потребуются при определении  $x$ ,  $y$ ,  $K_s$ , оптимальных для заданных удельно-экономических показателей (раздел 7.4).

### ***Поверхность охлаждения Т-МЭ***

У тороидальных магнитных элементов магнитопровод полностью закрыт обмотками катушки и считается, что поверхность охлаждения катушки  $\Pi_{ок}$  отдает тепло от потерь в магнитопроводе, то есть  $\Pi_{ок} = \Pi_{ос}$ . Способ охлаждения Т-МУ, естественное или

искусственное, на выражение  $\Pi_{ок}$  не влияет. Но есть два варианта для этого выражения.

*Вариант 1:* Окно катушки Т-МУ в охлаждении участвует (довольно редкий для практики вариант).

Здесь

$$\begin{aligned} \Pi_{ок1} &= (2a + 2b + 2\pi \cdot c_{ксп}) [L_c = \pi(a + c)] = \\ &= a^2 2\pi(1 + y + \pi \cdot 0.3x)(1 + x) = \frac{2\pi}{y} S_c (1 + y + 0.47x)(1 + x) \frac{l_k}{l_k} = (5.16) \\ &= S_c \cdot l_k \cdot N_{ок1}. \end{aligned}$$

Для выражения  $N_{ок1}$  получается

$$N_{ок1} = \frac{2\pi}{y} \cdot \frac{(1 + y + 0.94x)(1 + x)}{l_k = \frac{2}{\sqrt{y}}(1 + y + 0.47x)}. \quad (5.17)$$

После преобразований:

$$N_{ок1} = \frac{\pi(1 + y + 0.94x)(1 + x)}{\sqrt{y}(1 + y + 0.47x)}. \quad (5.18)$$

*Вариант 2:* Окно катушки Т-МУ в охлаждении не участвует. Охлаждаются только снизу и сверху по окружностям кругов  $\Pi_{окн} = \Pi_{окв}$

$$\Pi_{окн} \neq \Pi_{окв} = \frac{\pi D_H^2}{4} \cdot 2 \quad (5.19)$$

и по периметру боковой поверхности  $\Pi_{окб}$

$$\Pi_{окб} = \pi \cdot D_H \cdot H. \quad (5.20)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} D_H &= 2a + c + 2c_{ксп}, \\ H &= b + 2c_{ксп}, \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

при  $c_{ксп} \approx 0.3c$ .

Выражение для поверхности охлаждения Т-МЭ по варианту 2 имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_{ок2} &= 2 \frac{\pi D_H^2}{4} + \pi D_H \cdot H = \pi D_H (0.5D_H + H) = \\ &= (2a + c + 0.6c)(a + 0.5c + 0.3c + b + 2 \cdot 0.3c) \pi = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2\pi(a + 0.5c + 0.3c)(a + b + 1.4c) = \\
&= 2\pi\left(a^2 = \frac{S_c}{y}\right)(1 + 0.8x)(1 + y + 1.4x)\frac{l_k}{l_k} = S_c \cdot l_k \cdot N_{\text{ок2}}. \quad (5.22)
\end{aligned}$$

Безразмерная поверхность охлаждения Т-МЭ для варианта 2  $N_{\text{ок2}}$  описывается выражением

$$N_{\text{ок2}} = \frac{2\pi}{y} \cdot \frac{(1 + 0.8x)(1 + y + 1.4x)}{l_k = \frac{2}{\sqrt{y}}(1 + y + 0.47x)}.$$

После преобразований

$$\boxed{N_{\text{ок2}} = \frac{\pi(1 + 0.8x)(1 + y + 1.4x)}{\sqrt{y}(1 + y + 0.47x)}}. \quad (5.23)$$

Как видно из выражений (5.18) и (5.23), значения величин  $N_{\text{ок1}}$  и  $N_{\text{ок2}}$  почти одинаковы. Объясняется это тем, что технологическое окно Т-МЭ, требуемое для намотки обмоток имеет не более (10÷12)% от общей поверхности охлаждения.

## 6. СВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН МЭ

Порядок расчетов и инженерного проектирования МЭ достаточно полно изложен в работах [1, 2, 4, 5]. До этих расчетов, ориентируясь на техническое задание, должны быть выбраны: конструктивное типополнение, материалы для магнитопровода и обмоток, способ охлаждения, допустимая температура перегрева и др. Главными расчетными величинами, определяющими все последующие процессы проектирования, являются:

*Магнитная индукция*

$$B \leq 12 \sqrt{N_{\text{ос}}^7 \cdot N_{\text{ок}} \cdot K_s \frac{M_{\text{в}}^7 \cdot M_{\text{п}}^2}{P_1^2 \cdot f_{1*}^{(7\gamma-2)}}}. \quad (1.6)$$

*Плотность тока в обмотках (усредненная)*

$$j \leq 12 \sqrt{\frac{N_{\text{ок}}^7 \cdot N_{\text{ос}} \cdot M_j^7 \cdot M_{\text{п}}^2 \cdot f_{1*}^{(2-\gamma)}}{K_s^5 \cdot P_1^2}}. \quad (2.6)$$

*Сечение магнитопровода внутри катушек*

$$S_c = \sqrt{\frac{P_1}{4\kappa_{\text{ф}} \cdot n_0 \cdot \kappa_{\text{зс}} \cdot f_1 \cdot \kappa_s \cdot j \cdot B}}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) получена из (1.5) для входной мощности  $P_1$ .

Подставляя значения  $B$  и  $j$  из (1.6) и (2.6), получаем

$$S_c = 12 \sqrt{\frac{N_{\text{ос}}^8 \cdot N_{\text{ок}}^8 \cdot M_{\text{в}}^7 \cdot M_j^7 \cdot M_{\text{п}}^4}{K_s^4 \cdot P_1^4 \cdot f_{1*}^{4(2\gamma-1)}}} =$$

$$\boxed{= 3 \sqrt{\frac{N_{\text{ос}}^2 \cdot N_{\text{ок}}^2 \cdot M_{\text{в}}^{\frac{7}{4}} \cdot M_j^{\frac{7}{4}} \cdot M_{\text{п}}}{K_s \cdot P_1 \cdot f_{1*}^{(2\gamma-1)}}} = S_c. \quad (4.6)$$

Как видно из выражений (1.6), (2.6) и (4.6), все три исходные для проектирования МЭ величины содержат безразмерные поверхности охлаждения сердечников  $N_{\text{ос}}$  и катушек  $N_{\text{ок}}$ , и чем они больше, тем лучше.

В свою очередь величины  $N_{oc}$ ,  $N_{ок}$  и  $K_s$  являются функциями относительных размеров  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , оптимальные значения которых определяются из условия обеспечения наилучших показателей УЭП для заданных критериев минимума объема, веса или цены МЭ на единицу его входной мощности  $P_1$ .

Оптимизация показателей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  проводится в разделе 7.

## 7. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЭ

### 7.1. Основные уравнения для оптимизации

Цель оптимизации геометрических показателей МЭ: определить геометрические значения величин  $x_0, y_0, z_0, K_{s0}$ , обеспечивающие наилучшие удельно-экономические показатели МЭ для заданных критериев минимума объема, массы (веса) и стоимости при известной входной мощности  $P_1$ . Для инженерной практики удобен **компромиссный** вариант оптимизации, когда минимумы УЭП указанных выше трех критериев обеспечиваются близкими по своим значениям, например — отличаются на  $\pm 5\%$ .

Минимумы УЭП определяются из [2] по выражению

$$v_i = \psi_i \left( \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot K_s \cdot l_k + l_c \right) K_s^{-\frac{3}{4}}, \quad (7.1)$$

где  $\psi_i$  — сомножитель, характеризующий условие оптимизации. Например, для МЭ, проектируемых по условию обеспечения допустимого перегрева катушек и сердечников магнитопровода, он имеет значение

$$\psi_i = \psi_{\tau_k, \tau_c} = K_s^{\frac{1}{4}} / (N_{\text{ос}} \cdot N_{\text{ок}})^{0.5}. \quad (7.2)$$

Если оптимизируется геометрия МЭ, не зависящая от физических величин  $j$  и  $B$ , то  $\psi_{\tau_k, \tau_c} = 1$ .

В данной книге оптимизация величин  $x, y, z$  будет проведена для случая, когда геометрия МЭ **не зависит** от физических величин  $B, j, f_1$  и др. Этот вариант является наиболее распространенным в инженерной практике, как дающий наиболее компактные, близкие к кубу, конструктивные формы МЭ и обеспечен простыми аналитическими приемами теоретических анализов.

Формула для оптимизации  $x, y, z$  имеет вид уравнения (7.1) при  $\psi_i = 1$  или уравнения (1.12), полученного в разделе 1.

С учетом значений  $l_c$  по (1.7) и  $l_k$  по (1.9) указанные выше уравнения получают вид

$$v = r' \cdot K_s^{-\frac{3}{4}} \left[ \left( r_0 = \frac{K_{эс}}{K_{эж}} \cdot \frac{r}{r'} \right) \cdot K_s (r \cdot n + n \cdot \sqrt{y} + q \cdot x) + (m' + q' \cdot x + p \cdot z) \right] \frac{1}{\sqrt{y}}. \quad (7.3)$$

Выражение (7.3), как функция  $v(K_s)$  для семейств кривых при  $x, y, z$  неизменных имеет минимумы. Это позволяет записать систему уравнений для частных производных

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial y} &= r_0 K_s n - (r_0 K_s m + m') \frac{1}{y} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= r_0 K_s q + q' - p K_s \frac{x^2}{y} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial z} &= p - K_s (r_0 K_s q + q') \frac{z^2}{y} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Из тождества (7.4) получаем

$$y_0 = \frac{m}{n} + \frac{m'}{r_0 K_{s0} n}, \quad (7.5)$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{y_0 p K_{s0}}{r_0 K_{s0} q + q'}}, \quad (7.6)$$

$$z_0 = \sqrt{\frac{y_0 K_{s0}}{p} (r_0 K_{s0} q - q')}. \quad (7.7)$$

В выражениях (7.5), (7.6), (7.7) значения  $K_{s0}$  определяется по точкам минимумов кривых  $v(K_s, r_0)$  или по формуле

$$K_{s0} = \frac{\alpha}{r_0} \text{ при } \alpha = 0.5 \left( \frac{m'}{m} + \frac{q'}{q} \right). \quad (7.7a)$$

Всегда должны выполняться тождества

$$K_{s0} = \frac{x_0 z_0}{y_0}, \quad z_0 = \frac{K_{s0} y_0}{x_0}.$$

Подставляя в выражение (7.3) значения  $x, y, z$  без индекса «0» из (7.5), (7.6), (7.7), получаем

$$v = 2r' \cdot K_s^{-\frac{1}{4}} \left[ \sqrt{n \cdot m \cdot r_0 \left( r_0 K_s + \frac{m'}{m} \right)} + \sqrt{p \cdot q \left( r_0 K_s + \frac{q'}{q} \right)} \right]. \quad (7.8)$$

Выражение (7.8) достаточно точно аппроксимируется формулой

$$\upsilon = A^4 \sqrt{\frac{(r_0 K_s + \alpha)^2}{K_s}}, \quad (7.9)$$

где

$$\alpha = 0.5 \left( \frac{m'}{m} + \frac{q'}{q} \right), \quad (7.10)$$

$$A = 2r' \left( \sqrt{m \cdot n \cdot r_0} + \sqrt{p \cdot q} \right), \quad (7.11)$$

$$r_0 = \frac{K_{\text{эк}}}{K_{\text{эс}}} \frac{r}{r'}. \quad (7.12)$$

Частная производная  $\partial \upsilon / \partial K_s = 0$  дает

$$r_0 K_s = \alpha,$$

откуда

$$K_{s0} = \frac{\alpha}{r_0}. \quad (7.13)$$

Области минимумов кривых  $\upsilon = f(K_s, r_0)$  не являются узкими, поэтому, кроме однозначного определения  $K_{s0}$  по (7.13), можно брать величину этого коэффициента из кривых  $\upsilon(K_s, r_0)$  в пределах  $K_{s0\text{мин}} < K_{s0} < K_{s0\text{мак}}$ , соответствующих двум значениям  $\upsilon = 1.05\upsilon_{\text{мин}}$  (левое и правое).

### ***Расчеты параметра $r_0$***

Этот параметр определяется по выражению (7.12). Он показывает, как единицы объема катушек и магнитопровода МЭ отличаются в сравнительной оценке по весу (массе) или цене. При оптимизации по объему всегда  $K_{\text{эк}} = K_{\text{эс}}$ .

Экономические показатели единицы объема для массы определяются по формулам (1.3)

$$K_{\text{эк}} = K_{\text{зк}} g_{\text{к}}, \quad K_{\text{эс}} = K_{\text{зс}} g_{\text{с}};$$

для стоимости (цены) — по (1.4)

$$K_{\text{ЭК}} = K_{\text{ЭК}} g_{\text{К}} \Pi_{\text{К}}, \quad K_{\text{ЭС}} = K_{\text{ЭС}} g_{\text{С}} \Pi_{\text{С}}.$$

Численные значения  $K_{\text{ЭК}}$  и  $K_{\text{ЭС}}$  зависят от выбранных для обмоток и магнитопровода материалов.

Обмотки могут быть выполнены проводниками из меди или алюминия их сечения — круглыми, прямоугольными (шинки), ленточными, многожильными; изоляция — низковольтная или высоковольтная, да еще разделять по классам термостойкости. Указанные разнообразия имеют вполне определенные значения коэффициента заполнения катушек  $K_{\text{ЭК}}$ , удельного веса проводников  $g_{\text{К}}$  и их цены  $\Pi_{\text{К}}$ .

Магнитопроводы выполняются из сталей (электротехнические, сплавы, пермаллой и др.) или быть прессованными (ферриты, оксиферы и др.). Это определяет значения коэффициентов заполнения  $K_{\text{ЭС}}$ , удельного веса  $g_{\text{С}}$  и цены  $\Pi_{\text{С}}$  сердечников.

В целом численные значения  $K_{\text{ЭК}}$  и  $K_{\text{ЭС}}$  имеют большой диапазон. Например, если проводники круглые, алюминиевые, с низковольтной изоляцией, а магнитопровод из сталей, то получится  $K_{\text{ЭК}}/K_{\text{ЭС}} \approx 0.15$ . При замене сталей на феррит  $K_{\text{ЭК}}/K_{\text{ЭС}} \approx 0.2$ . Если алюминий заменить на медь, то для магнитопровода из сталей  $K_{\text{ЭК}}/K_{\text{ЭС}} \approx 0.25$ . При выполнении обмоток из медной шинки с низковольтной изоляцией, а сердечник из сталей  $K_{\text{ЭК}}/K_{\text{ЭС}} \approx 0.45$ . Замена здесь сердечника из сталей на феррит даст  $K_{\text{ЭК}}/K_{\text{ЭС}} \approx 0.6$ .

Для ценовых данных соотношение экономических показателей может быть в пределах  $2.5 \div 1.5$ .

Таким образом, для каждого конкретного случая оптимизаций величин  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  и  $K_{s0}$  нужно подсчитать свое значение  $r_0$  по формуле (7.12).

В данной книге будут проводиться анализы для (4÷5) значений  $r_0$ , например: 2, 1, 0.5, 0.15.

В заключение отметим, что выражение (7.9) и его составляющие части (7.10)÷(7.13) справедливы для МЭ всех конструктивных исполнений.

## 7.2. Оптимизация геометрии стержневых магнитных элементов

Значения конструктивных коэффициентов С-МЭ определены и представлены в разделе 2:

$$\text{для } l_k: r = 2, m = 1, n = 1, q = 0.7; \quad (\text{по 2.5})$$

$$\text{для } l_c: r' = 2, m' = 0.5\pi, q' = 1, p = 1. \quad (\text{по 2.9})$$

Получаем:

$$\alpha = 0.5 \left( \frac{m'}{m} + \frac{q'}{q} \right) = 0.5 \left( \frac{0.5\pi}{1} + \frac{1}{0.7} \right) = 1.5. \quad (\text{по 7.10})$$

$$\begin{aligned} A &= 2r' \left( \sqrt{m \cdot n \cdot r_0} + \sqrt{p \cdot q} \right) = 2.2 \left( \sqrt{1 \cdot 1 \cdot r_0} + \sqrt{1 \cdot 0.7} \right) = \\ &= 4 \left( \sqrt{r_0} + 0.84 \right). \quad (\text{по 7.11}) \end{aligned}$$

Теперь для построения кривых  $\upsilon(r_0, K_s)$  для С-МЭ получаем

$$\upsilon(r_0, K_s) = 4 \left( \sqrt{r_0} + 0.84 \right) \sqrt[4]{(r_0 K_s + 1.5)^2}. \quad (7.14)$$

Здесь сомножитель 4 можно убрать, как масштабный.

Семейство кривых по (7.14) показано на рис. 7.1. Построены они по точкам табл. 7.1.

Таблица 7.1 — Построение кривых  $\upsilon(r_0, K_s)$  по (7.14) (рис. 7.1)

	Значения $\upsilon$ для $K_s =$							Значения $K_{s0}$ по (7.7а)
	0.02	0.2	0.3	0.5	1	1.5	2	
$r_0 = 2$	7.52	4.7	4.46	4.29	4.27	4.37	4.5	0.75
$r_0 = 1.5$	6.87	4.19	3.94	3.73	3.62	3.66	3.73	1
$r_0 = 1$	6.03	3.59	3.34	3.1	2.9	2.88	2.9	1.5
$r_0 = 0.5$	5.06	2.93	2.69	2.44	2.19	2.1	2.06	3
$r_0 = 0.15$	3.84	2.18	1.98	1.76	1.52	1.4	1.33	10

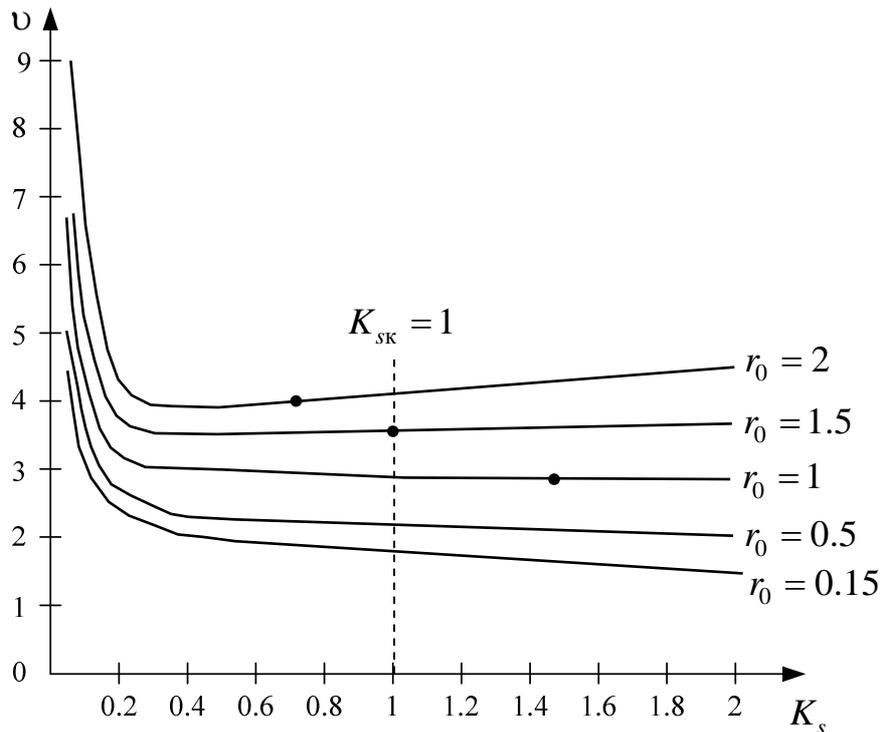


Рис. 7.1

Как видно из рис. 7.1 и табл. 7.1, кривые  $v(r_0, K_s)$  являются очень пологими со слабо выраженным минимумом. Это даст большую свободу выбора значений  $x_0$ ,  $z_0$  для заданных  $r_0$ .

Для каждой из кривых на рис. 7.1 по формулам (7.5), (7.6) и (7.7) определены показатели величин  $x_0$ ,  $y_0$  и  $z_0$ . Данные приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2 — Оптимальные значения  $x_0$ ,  $z_0$ ,  $y_0$  для С-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры				
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках	2	0.75	0.85	1.75	2
Цены при алюминиевых обмотках	1.5	1	1	1.6	2
Объема	1	1.5	1.2	2.5	2
Массы (веса) при медных обмотках	0.5	3	1.7	3.5	2
Массы при алюминиевых обмотках	0.15	10	3	6.5	2
Компромиссной геометрии	1	1	1	2	2

Особенности параметров табл. 7.2 следующие.

Значение  $y_0$  не зависит от  $r_0$  и  $K_{s0}$  и остается равным 2.

Значения  $x_0$  и  $z_0$  увеличиваются с увеличением параметра  $r_0$ .

Слабая зависимость показателя  $\upsilon$  от значений  $K_s$  дает большие свободы значений  $x$  и  $z$  для инженерных расчетов.

Очень хорошие показатели имеет компромиссная геометрия.

### 7.3. Оптимизация геометрии броневых магнитных элементов

Значения конструктивных коэффициентов Б-МЭ определены и представлены в разделе 3:

для  $l_k$ :  $r = 2$ ,  $m = 1$ ,  $n = 1$ ,  $q = 1.4$ ; (по 3.6)

для  $l_c$ :  $r' = 2$ ,  $m' = 0.25\pi$ ,  $q' = 1$ ,  $p = 1$ . (по

3.11)

Получаем:

$$\alpha = 0.5 \left( \frac{m'}{m} + \frac{q'}{q} \right) = 0.5 \left( \frac{0.25\pi}{1} + \frac{1}{1.4} \right) = 0.75. \quad (\text{по 7.10})$$

$$\begin{aligned} A &= 2r' \left( \sqrt{m \cdot n \cdot r_0} + \sqrt{p \cdot q} \right) = 2.2 \left( \sqrt{1 \cdot 1 \cdot r_0} + \sqrt{1 \cdot 1.4} \right) = \\ &= 4 \left( \sqrt{r_0} + 1.18 \right). \quad (\text{по 7.11}) \end{aligned}$$

Для построения кривых  $\upsilon(r_0, K_s)$  согласно выражению (7.9) получаем для Б-МЭ

$$\upsilon = A^4 \sqrt[4]{\frac{(r_0 K_s + \alpha)}{K_s}} = 4 \left( \sqrt{r_0} + 1.18 \right)^4 \sqrt[4]{\frac{(r_0 K_s + 0.75)^2}{K_s}}.$$

Опуская масштабное число 4 будем иметь

$$\boxed{\upsilon(r_0, K_s) = \left( \sqrt{r_0} + 1.18 \right)^4 \sqrt[4]{\frac{(r_0 K_s + 0.75)^2}{K_s}}.} \quad (7.15)$$

По выражению (7.15) построим кривые  $\upsilon(r_0, K_s)$  для таких же значений  $r_0$ , как они были взяты у С-МЭ, то есть  $r_0 = 2, 1.5, 1, 0.5$  и  $0.15$ . Эти кривые показаны на рис. 7.2. Данные для расчетов приведены в табл. 7.3.

	Значения $\upsilon$ для $K_s =$							Значения $K_{s0}$ по (7.7а)
	0.02	0.2	0.3	0.5	1	1.5	2	
$r_0 = 2$	6.12	4.15	4.07	4.01	4.3	4.53	4.75	0.375
$r_0 = 1.5$	5.64	3.68	3.55	3.5	3.6	3.78	5.67	0.5
$r_0 = 1$	4.96	3.18	3.02	2.9	2.88	2.95	3.04	0.75
$r_0 = 0.5$	4.57	2.72	2.53	2.34	2.2	2.18	2.19	1.5
$r_0 = 0.15$	3.62	2.07	1.89	1.7	1.49	1.4	1.35	5

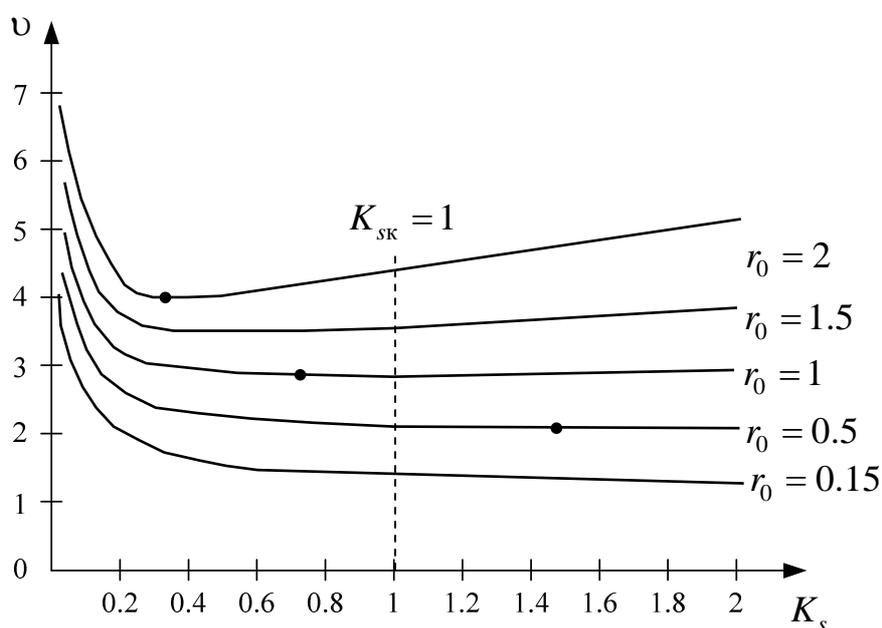


Рис. 7.2

Как видно из рис. 7.2 кривые  $\upsilon(r_0, K_s)$  являются, как у С-МЭ пологими со слабо выраженными минимумами. При этом их оптимальные значения  $K_{s0}$  ровно в 2 раза меньше, чем у С-МЭ. Для

каждой из кривых на рис. 7.2 по формулам (7.5), (7.6) и (7.7) определены показатели величин  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ . Данные приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4 — **Оптимальные значения**  $x_0$ ,  $z_0$ ,  $y_0$  для Б-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры				
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках	2	0.375	0.6	1.25	2
Цены при алюминиевых обмотках	1.5	0.5	0.7	1.4	2
Объема	1	0.75	0.9	1.7	2
Массы (веса) при медных обмотках	0.5	1.5	1.2	2.5	2
Массы при алюминиевых обмотках	0.15	5	2.5	4.5	2
Компромиссной геометрии	1	1	1	2	2

Особенности параметров табл. 7.4 следующие.

Значение  $y_0$  не зависит от  $r_0$  и  $K_{s0}$  и остаются равными 2.

Значения  $x_0$  и  $z_0$  увеличиваются с увеличением  $r_0$ , по сравнению с показателями для С-МЭ это увеличение составляет примерно 1.4 раза для каждой из позиций  $r_0$ .

Слабая зависимость показателя  $\upsilon$  от значений  $K_s$  дает большие свободы выбора  $x$  и  $z$  при инженерных расчетах. Очень хорошие показатели имеет компромиссная геометрия.

#### **7.4. Оптимизация геометрии чашечных магнитных элементов**

Отличительными особенностями чашечных магнитных элементов (Ч-МЭ), конструктивное исполнение и выражения для геометрии которых приведены в разделе 4 являются:

1. Магнитопроводы их выполняют из прессованных ферроматериалов, например — ферритов.

2. Магнитопроводы всегда круглые из двух одинаковых «чашек». Катушка с обмотками помещается внутри этих чашек. Окно имеет **полное** заполнение проводниками обмоток. Тепловые потери мощности от нагрева обмоток отводятся в окружающую среду через поверхность охлаждения магнитопровода. В расчетах принимается  $N_{\text{ох.к}} = N_{\text{ох.с}}$ .

3. Обмотки Ч-МЭ выполняются **многожильными**, поскольку элемент работает на высоких частотах, 15 кГц и более.

4. Для Ч-МЭ всегда  $y = 1$ , поэтому значения величин  $l_k$ ,  $l_c$  и  $K_s$  зависят от  $x$  и  $z$ . В разделе 4 эти величины описаны выражениями

$$K_s = 1.5x \cdot z, \quad (4.9)$$

$$l_k = 4(1+x), \quad (4.15)$$

$$l_c = 2.34(0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + x \cdot z). \quad (4.20)$$

Для оптимизации геометрии Ч-МЭ, **независимой** от физических величин, будем использовать формулу относительного геометрического показателя  $\upsilon$ , полученную в разделе 1

$$\upsilon = \frac{1}{\frac{3}{K_s^4}} \left( \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot l_k \cdot K_s + l_c \right). \quad (1.12)$$

Подставим в выражение (1.12) для его сомножителя в скобках значения  $l_k$ ,  $l_c$ ,  $K_s$  из (4.9), (4.15), (4.20). Получаем

$$\upsilon_0 = \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot K_s \cdot 4(1+x) + 2.34(0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + x \cdot z). \quad (7.16)$$

С учетом, что по (4.9)  $K_s = 1.5x \cdot z$ , выражение (7.16)

$$\begin{aligned} \upsilon_0 &= \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot K_s \cdot 4(1+x) + 2.34(0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + 0.66K_s) = \\ &= 2.34 \left[ r_0 K_s (1+x) + 0.45 + 1.4x + x^2 + 1.1z + 0.66K_s \right], \end{aligned} \quad (7.17)$$

$$\text{где } r_0 = \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot \frac{4}{2.34} = r'. \quad (7.18)$$

Учитывая, что из (4.9)

$$x = \frac{K_s}{1.5z}, \quad z = \frac{K_s}{1.5x},$$

из выражения (7.17) получаем формулы  $v_0(x)$  и  $v_0(z)$ :

$$v_0(x) = 2.34 \left[ r_0 K_s (1+x) + 0.45 + \frac{1.1K_s}{1.5x} + 1.4x + x^2 + 0.66K_s \right], \quad (7.19)$$

$$v_0(z) = 2.34 \left[ r_0 K_s \left( 1 + \frac{K_s}{1.5z} \right) + 0.45 + \frac{1.4K_s}{1.5z} + \left( \frac{K_s}{1.5z} \right)^2 + 1.1z + 0.66K_s \right]. \quad (7.20)$$

Частные производные от  $v_0(x)$  и  $v_0(z)$ , приравненные к «0» позволяют получить формулы для  $x(K_s)$  и  $z(K_s)$ .

$$\frac{\partial v_0(x)}{\partial x} = r_0 K_s + 1.4 - 2x - \frac{1.1K_s}{1.5} \cdot x^{-2} = 0. \quad (7.21)$$

Решение уравнения (7.21) дает приближенную, но достоверную формулу для  $x(K_s)$ :

$$x \cong 0.86 \sqrt{\frac{K_s}{r_0 K_s + 1.4}}. \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_0(z)}{\partial z} &= -\frac{r_0 K_s^2}{1.5} \cdot z^{-2} - \frac{1.4}{1.5} \cdot K_s \cdot z^{-2} - \frac{2K_s^2}{1.5^2} \cdot z^{-3} + 1.1 = 0 \\ r_0 K_s^2 + 1.4K_s + \frac{2K_s}{1.5} \cdot \frac{1}{z} &= 1.1z^2. \end{aligned} \quad (7.23)$$

Решение (7.23) приводит к приближенной формуле

$$z \cong 0.77 \sqrt{K_s (r_0 K_s + 1.4)}. \quad (7.24)$$

Подставляя  $x$  из (7.22) и  $z$  из (7.24) в выражение (7.20), получаем

$$\begin{aligned} v_0(K_s) &= r_0 K_s + r_0 K_s \cdot 0.86 \frac{\sqrt{K_s}}{\sqrt{r_0 K_s + 1.4}} + 0.45 + \\ &+ 1.4 \cdot 0.86 \frac{\sqrt{K_s}}{\sqrt{r_0 K_s + 1.4}} + 0.86^2 \frac{K_s}{r_0 K_s + 1.4} + \\ &+ 1.1 \cdot 0.77 \sqrt{K_s (r_0 K_s + 1.4)} + 0.66K_s. \end{aligned}$$

После преобразований

$$v_0(K_s) = K_s \left( \frac{1.72}{K_s^{0.5}} \sqrt{r_0 K_s + 1.4} + \frac{0.45}{K_s} + \frac{0.74}{r_0 K_s + 1.4} + 0.66K_s \right). \quad (7.25)$$

Теперь выражение (1.12) с учетом  $v_0(K_s)$  по (4.25) записывается в виде:

$$v(r_0, K_s) = K_s^{-\frac{3}{4}} \cdot v_0(K_s) = \frac{1.72}{K_s^{0.25}} \sqrt{r_0 K_s + 1.4} + K_s^{0.25} \left( 0.66 K_s + \frac{0.74}{r_0 K_s + 1.4} \right) + \frac{0.45}{K_s^{0.75}} = v(r_0, K_s). \quad (7.26)$$

По выражению (4.26) осуществляется оптимизация геометрии чашечных МЭ. Строятся кривые  $v(r_0, K_s)$  для удельно-экономических критериев минимума цены, минимума объема и минимума массы Ч-МЭ. Каждому из этих критериев соответствует его экономическим показателем  $r_0$  по формуле (7.18).

У кривой УЭП оптимизации объема  $K_{\text{эк}} = K_{\text{эс}} = 1$ , что дает

$$r_{0v} = \frac{1.4}{1 \cdot 2 \cdot 34} \approx 1.7. \quad (7.27)$$

Для кривой оптимизации массы следует учитывать, что у Ч-МЭ обмотки всегда **медные**, многожильные, а магнитопровод ферритовый. Поэтому в расчетах следует использовать параметры:

удельный вес проводников обмоток  $g_k = 8.8 \text{ г/см}^3$ ,

заполнение окна сечениями проводников  $K_{\text{ок}} = 0.3$ ,

удельный вес материала магнитопровода  $g_c = 5 \text{ г/см}^3$ ,

заполнение ферромагнетика материалом  $K_{\text{зс}} = 1$ .

Получаем для коэффициента экономического показателя кривой оптимизации массы

$$r_{0g} = \frac{(K_{\text{эк}} = g_k K_{\text{ок}})(r = 4)}{(K_{\text{эс}} = g_c K_{\text{зс}})(r' = 2.34)} = \frac{8.8 \cdot 0.3 \cdot 4}{5 \cdot 1 \cdot 2.34} = 0.9. \quad (7.28)$$

Для коэффициента экономического показателя кривой оптимизации цены имеем

$$r_{0ц} = r_{0g} \frac{Ц_k}{Ц_c}. \quad (7.29)$$

По имеющейся статистике данных для Ч-МЭ с медными обмотками  $Ц_k / Ц_c = 4 \div 5.5$ . Диапазон значений обусловлен классом изоляции проводников и числом их «жил». Получаем

$$r_{0ц} = r_{0g} (4 \div 5.5) = 0.9(4 \div 5.5) = 3.6 \div 4.95.$$

Для построения кривой  $v(r_{0ц}, K_s)$  принимаем  $r_{0ц} = 5$ . Кривые  $v(r_0, K_s)$  по выражению (7.26) для значений  $r_{0V} = 1.7$ ,  $r_{0g} = 1$  и  $r_{0ц} = 5$  построенные с помощью ЭВМ показаны на рис. 7.3.

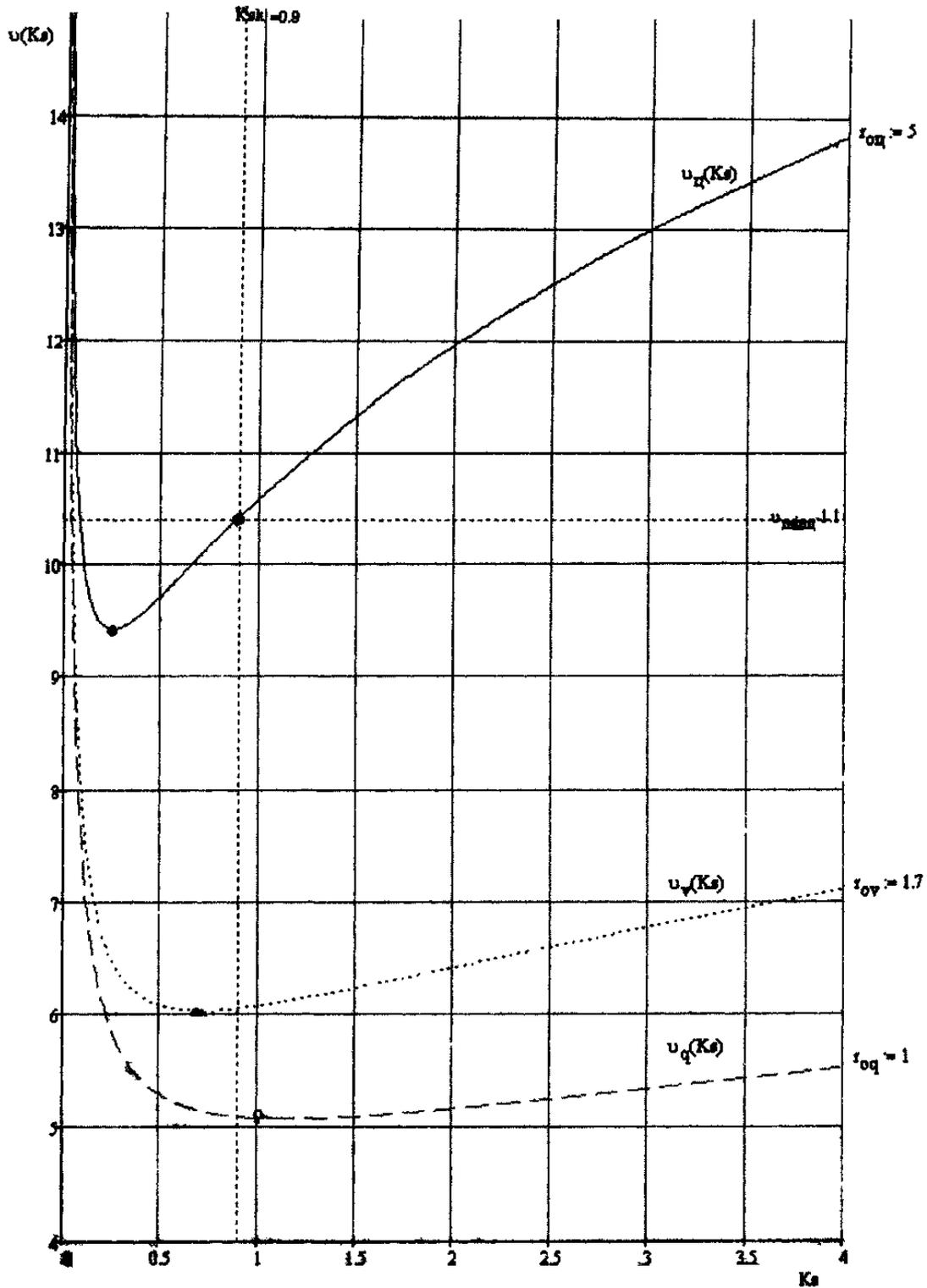


Рис. 7.3

Минимумы этих кривых ЭВМ определила по формуле

$$K_{s0} := \text{root} \left( \frac{d}{dK_s} \upsilon(r_0, K_s), K_s \right).$$

Округленно для координаты  $K_s$  они имеют значения

$$K_{s0V} = 0.7, K_{s0g} = 1.15, K_{s0ц} = 0.3. \quad (7.30)$$

Для  $K_{s0}$  по (7.30) из выражения (7.22) и (7.24) определены  $x_0$  и  $z_0$ . Они имеют округленные значения

$$\left. \begin{aligned} x_{0V} = 0.5, \quad x_{0g} = 0.6, \quad x_{0ц} = 0.3; \\ z_{0V} = 1, \quad x_{0g} = 1.3, \quad x_{0ц} = 0.7. \end{aligned} \right\} \quad (7.31)$$

По формулам геометрии Ч-МЭ в разделе 4 для  $l_k$  (4.1),  $l_c$  (4.20),  $N_{0c}$  (4.26) вычислены их численные значения для экономических показателей  $r_{0V}$ ,  $r_{0g}$  и  $r_{0ц}$ . Сделаны также расчеты для компромиссной геометрии, когда  $K_{s0} = 0.9$ .

Все рассчитанные показатели **оптимальных** относительных значений геометрии Ч-МЭ приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5 — Показатели оптимальной геометрии Ч-МЭ

Геометрич. пар-ры	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$	$N_{0c}$	$l_c$	$l_k$
УЭП						
Цены	0.3	0.3	0.7	4.3	4.3	5.2
Объема	0.7	0.5	1	4.2	6.7	6
Массы	1.15	0.6	1.3	4.0	8.7	6.4
Компромиссные	0.9	0.5	1.1	5.3	7.5	6

Данные табл. 7.5 позволяют сделать все необходимые инженерные расчеты Ч-МЭ, в том числе главные из них:

- сечение  $S_c$  с линейными размерами всего элемента (формула 4.6);
- рабочую индукцию  $B$  (формула 1.6);
- плотность тока в проводниках обмоток  $j$  (формула 2.6).

В целом Ч-МЭ имеют редкое применение: как индуктивность для высокочастотных фильтров или как согласующее уст-

ройство для гальванической развязки цепей в электрических системах (трансформатор).

В технической литературе [1, 3, 4, 6, 8] и др. приводятся данные выпускаемой серийной партии Ч-МЭ со шкалой параметров на 10 позиций. Каждая из них имеет примерно одинаковые показатели:

$$x = 0.5, z = 1 \div 1.1, K_s = 0.75.$$

Это по табл. 7.5 соответствует удовлетворению УЭП для минимума объема.

Для других критериев серийных Ч-МЭ нет.

Выпускаемые Ч-МЭ имеют очень малые размеры:

максимальные  $D = 48$  мм,  $H = 5.5$  мм;

минимальные  $D = 6.5$  мм,  $H = 5.5$  мм.

При частоте питания сети  $f_1 = 20$  кГц, плотность тока в обмотках  $j = 2.5$  А/мм<sup>2</sup>, рабочей индукции  $B = 0.3$  Тл входная мощность  $P_1$  чашечных МЭ лежит в пределах от 100 Вт до 5 кВт. Это очень мало.

## 7.5. Оптимизация геометрии тороидальных магнитных элементов

Конструктивное исполнение и выражение геометрии Т-МЭ представлены в разделе 5.

Конструктивные коэффициенты этого элемента имеют значения:

$$\text{для } l_c: r' = \pi, m' = 1, q' = 1, p = 0; \quad (\text{по 5.11})$$

$$\text{для } l_k: m = 1, n = 1, q = 0.47, r = 2. \quad (\text{по 5.7})$$

Для тороидальных МЭ имеем

$$K_s = \frac{S_{ок}}{S_{ос}} = \frac{\pi \cdot c^2}{4a \cdot b} = \frac{\pi \cdot x^2}{4y}. \quad (7.32)$$

Из (7.32) получаем

$$x = \sqrt{\frac{4y}{\pi} \cdot K_s}. \quad (7.33)$$

Для независимой геометрии Т-МЭ выражение для  $\nu$  имеет вид (получено из (7.3) при  $p = 0$ ):

$$v = r' \cdot K_s^{-\frac{3}{4}} \left[ r_0 \cdot K_s (m + n \cdot \sqrt{y} + q \cdot x) + m' + q' \cdot x \right] \frac{1}{\sqrt{y}}. \quad (7.34)$$

Частная производная от  $v$  по (7.34)  $\partial v / \partial y = 0$  дает

$$y_0 = \frac{m}{n} + \frac{m'}{r_0 \cdot K_{s0} \cdot n}. \quad (7.35)$$

Формула (7.35) не отличается от полкченной ранее формулы (7.5).

Координаты  $K_{s0}$  для минимумов кривых  $v$  по выражению (7.34) при  $y = y_0$ ,  $x = x_0$  имеют значения

$$K_{s0} \cdot r_0 = \alpha \text{ при } \alpha = 0.5 \left( \frac{m'}{m} + \frac{q'}{q} \right). \quad (7.36)$$

Эта формула тоже не отличается от (7.13).

Для Т-МЭ имеем

$$\alpha = 0.5 \left( \frac{m' = 1}{m = 1} + \frac{q' = 1}{q = 0.47} \right) = 1.56. \quad (7.37)$$

Теперь будем иметь

$$K_{s0} = \frac{\alpha = 1.56}{r_0}. \quad (7.38)$$

Величину  $r_0$  для каждого из критериев минимизации УЭП будем определять по (7.12)

$$r_0 = \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} \cdot \frac{r}{r'}. \quad (7.12)$$

Для критерия оптимизации объема всегда  $K_{\text{ЭК}} = K_{\text{ЭС}} = 1$ , что дает

$$r_{0V} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2}{\pi} = 0.64.$$

Для ценового показателя, когда обмотки алюминиевые и магнитопровод из электротехнических сталей примерно получается

$$r_{0ц} = 0.64 \left( \frac{K_{\text{ЭК}}}{K_{\text{ЭС}}} = 1.5 \right) \approx 1.$$

Такое же значение  $r_0$  получается, если обмотки медные, магнитопровод из сплавов типа пермаллой, Н-50 или обмотки алюминиевые, а магнитопровод прессованный из феррита, оксифера.

Для медных обмоток и магнитопровода из электротехнических сталей получается

$$r_{0ц} \approx 1.5.$$

Для медных обмоток и прессованных сердечников получается

$$r_{0ц} = 0.63 \cdot 3 \approx 2.$$

При минимизации весовых показателей величина  $r_{0g}$  получается в пределах 0.25 и менее.

Для указанных выше экономических показателей  $r_0$ , определяющих минимумы кривых  $\nu(r_0, K_s)$  определены значения  $K_{s0}$ , соответствующие им значения  $x_0$  и построены кривые на рис. 7.4. Данные сведены в табл. 7.6.

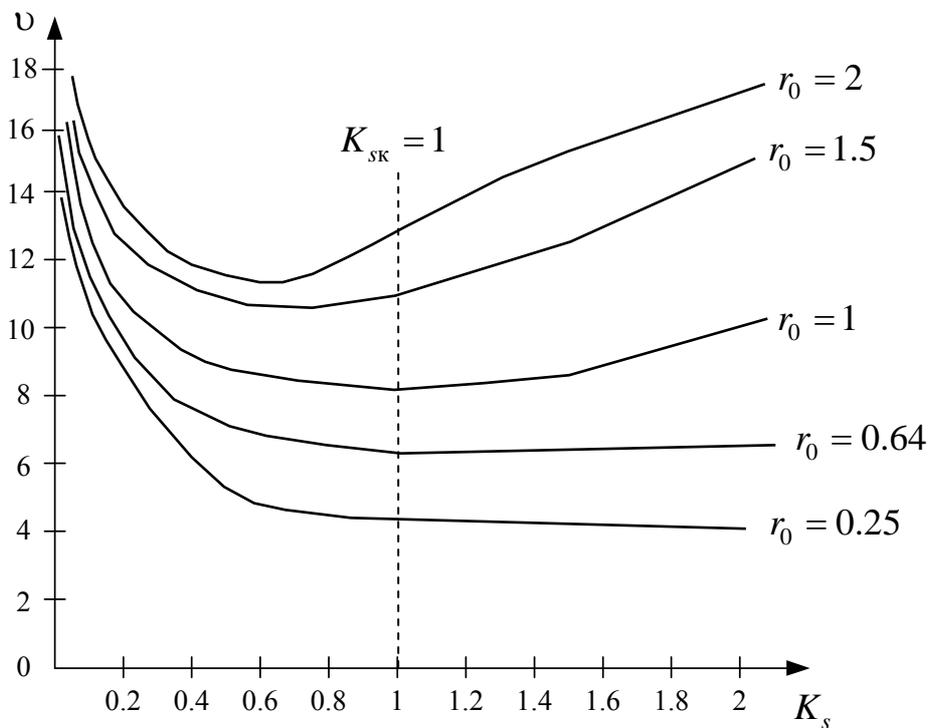


Рис. 7.4

Таблица 7.6

	$x_0$	v при $K_s =$						$K_{s0} = \frac{\alpha = 1.56}{r_0}$
		0.02	0.2	0.5	1	1.5	2	
$r_0 = 2$	1.4	49.5	13.6	11.2	13.5	14.5	17.5	0.8
$r_0 = 1.5$	1.7	33.3	12.2	10.7	11.0	12.7	13.8	1.1
$r_0 = 1$	2	15.7	10.7	8.8	8.5	8.7	10.1	1.6
$r_0 = 0.64$	2.5	15.6	9.6	7.4	6.7	6.6	6.5	2.4
$r_0 = 0.25$	4	15.3	9.3	5.3	4.7	4.6	4.4	6.2

Для табл. 7.4 с округлениями получено

$$\alpha = 0.5 \left( \frac{m' = 1}{m = 1} + \frac{q' = 1}{q = 0.47} \right) = 1.56.$$

$$r_{0V} = \frac{r = 2}{r' = \pi} = 0.64.$$

По (7.35):

$$y_0 = \frac{m}{n} + \frac{m'}{\alpha \cdot n} = \frac{1}{1} + \frac{1}{1.56 \cdot 1} = 1.64 \approx 2.$$

По (7.33):

$$x_0 = \sqrt{\frac{4y_0}{\pi} \cdot K_s} \approx 1.6 \sqrt{K_{s0}}.$$

Для компромиссной геометрии Т-МЭ, когда  $K_{s0} = 1$ , получается  $x_{0к} = 1.6$ .

Показатели оптимальной геометрии Т-МЭ приведены в табл. 7.7.

Таблица 7.7 — Показатели оптимальной геометрии Т-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры			
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках и пресованном сердечнике	2	0.8	1.4	2
Цены при медных обмотках и сердечнике из электротехнических сталей	1.5	1.1	1.7	2

Окончание табл. 7.7

Минимумы УЭП для	Параметры			
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$y_0$
Цены при алюминиевых обмотках и сердечнике из электротехнических сталей	1	1.6	2	2
Объема	0.64	2.4	2.5	2
Массы усредненного варианта	025	6.2	4	2
Компромиссной геометрии	1	1.6	1.6	2

В целом, как видно из рис. 7.4, области минимумов кривых  $\upsilon(r_0, K_s)$  для Т-МЭ очень пологие в широком диапазоне значений  $K_s$ . Это дает большую свободу выбора для инженерной практики технологических параметров  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . От расчетных оптимальных они могут без ущерба для УЭП отличаться в большую или меньшую сторону примерно в 2 раза.

Сказанное справедливо и для других типовых конструкций МЭ — стержневых, броневых и чашечных, у которых оптимальные значения  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  приведены в таблицах П.7.2 (С-МЭ), П.7.4 (Б-МЭ) и П.7.5 (Ч-МЭ).

Указанные таблицы, включая табл. П.7.7 для Т-МЭ, приведены в Приложении 1, чтобы использовать их данные при инженерных расчетах без перелистывания страниц монографии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной монографии получены выражения для очень важных геометрических показателей, параметров и величин, без которых невозможно оптимальное инженерное проектирование и расчеты магнитных элементов электронных устройств.

Для типовых конструкций МЭ получены выражения поверхностей охлаждения катушек  $N_{0к}$  и сердечников  $N_{0с}$ , относительных значений средних длин катушек  $l_k$  и сердечников  $l_c$ , определяющих оптимальные значения рабочей индукции  $B$ , плотности тока  $j$  и сечения магнитопровода  $S_c$  по формулам (1.6), (2.6) и (4.6), соответственно.

Для типовых условий оптимизации по критериям минимума цены, объема, массы и компромиссного (усредненного) критерия определены наилучшие значения соотношений окна и сечения магнитопровода  $K_{s0} = S_{0к}/S_c$  и соответствующие им значения относительных показателей толщины  $y_0$ , ширины и высоты окна  $x_0$ ,  $z_0$ . Таблицы указанных выше параметров оптимальной геометрии четырех типовых конструкций МЭ (табл. 7.2, табл. 7.4, табл. 7.5 и табл. 7.7) приведены в разделе 7. Они же используются в литературе [4, 5].

Эти таблицы являются новыми в теории ферромагнитных устройств и очень важны для инженерной практики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1972. — 720 с.
2. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. — Томск: Изд-во Томского Государственного университета, 1987. — 165 с.
3. Михайлова М.М., Филиппов В.В., Муслимов В.П. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. — М.: Радио и связь, 1988. — 176 с.
4. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное пособие. — Томск: ТУСУР, 2007. — 125 с.
5. Обрусник В.П. Теория и практика оптимального расчета магнитных элементов: Монография. — Томск: ТУСУР, 2008. — 152 с.
6. Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. — М.: Энергия, 1973. — 152 с.
7. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные трансформаторы и дроссели: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 416 с.
8. Сидоров И.И. и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник. — М.: Радио и связь, 1989. — 384 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Таблицы с данными оптимальной геометрии МЭ

Таблица П.7.2 — Оптимальные значения  $x_0$ ,  $z_0$ ,  $y_0$  для С-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры				
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках	2	0.75	0.85	1.75	2
Цены при алюминиевых обмотках	1.5	1	1	1.6	2
Объема	1	1.5	1.2	2.5	2
Массы (веса) при медных обмотках	0.5	3	1.7	3.5	2
Массы при алюминиевых обмотках	0.15	10	3	6.5	2
Компромиссной геометрии	1	1	1	2	2

Таблица П.7.4 — Оптимальные значения  $x_0$ ,  $z_0$ ,  $y_0$  для Б-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры				
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках	2	0.375	0.6	1.25	2
Цены при алюминиевых обмотках	1.5	0.5	0.7	1.4	2
Объема	1	0.75	0.9	1.7	2
Массы (веса) при медных обмотках	0.5	1.5	1.2	2.5	2
Массы при алюминиевых обмотках	0.15	5	2.5	4.5	2
Компромиссной геометрии	1	1	1	2	2

Таблица П.7.5 — Показатели оптимальной геометрии Ч-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры			
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$z_0$
Цены	5	0.3	0.3	0.7
Объема	1.7	0.7	0.5	1
Массы	1	1.15	0.6	1.3
Компромиссной геометрии	1.7	0.9	0.5	1.1

Везде  $y_0 = 1$ , обмотки медные, магнитопровод ферритовый.

Таблица 7.7 — Показатели оптимальной геометрии Т-МЭ

Минимумы УЭП для	Параметры			
	$r_0$	$K_{s0}$	$x_0$	$y_0$
Цены при медных обмотках и прессованном сердечнике	2	0.8	1.4	2
Цены при медных обмотках и сердечнике из электротехнических сталей	1.5	1.1	1.7	2
Цены при алюминиевых обмотках и сердечнике из электротехнических сталей	1	1.6	2	2
Объема	0.64	2.4	2.5	2
Массы усредненного варианта	0.25	6.2	4	2
Компромиссной геометрии	1	1.6	1.6	2

ОБРУСНИК ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Монография

Рецензенты:

профессор кафедры электропривода и электрооборудования ТПУ,  
д-р техн. наук В.А. Бейнарович;  
директор Томского НИИ автоматики и электромеханики,  
профессор, д-р техн. наук Ю.А. Шурыгин

Бумага офсетная. Печать RISO. Усл. печ. л. 13.4. Уч. изд. Л. 12.4

Тираж 200. Цена свободная

Издательство Томского межвузовского центра  
дистанционного образования (ТМЦДО)

634050, Томск, пр. Ленина, 40